

Veli Koskinen

LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHDON TUTKIMINEN

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Marraskuu 2013




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Opinnäytetyön päivämäärä 28.11.2013	
Tekijä Veli Koskinen		Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka	
Nimeke Leikkaussalin ilmanvaihdon tutkiminen			
Tiivistelmä <p>Tavanomaisesti korkean puhtausluokan leikkaussalit on rakennettu laminaarikatoilla ja muut leikkaussalit perinteisellä sekoittavalla ilmanjaolla. Ruotsiin rakennettavaa sairaalaa varten kehitettiin uuden tyyppinen sekoittavaan ilmanjakoon perustuva ratkaisu. Ratkaisussa on yhdistetty laminaarivirtaukselle tyypilliset korkea ilmanvaihtokerroin ja korkea suodatusaste yhdessä sekoittavan ilmanjaon hyvän sekoitusasteen kanssa. Työni tarkoituksena oli optimoida ratkaisun ilmanjaon tehokkuutta, tutkia sen toimivuutta leikkaussalissa ja selvittää, mihin puhtausluokkaan ratkaisulla ylletään.</p> <p>Tutkimusta varten Halton Oy rakensi Kausalan tehtaalle yhtä leikkaussalia vastaavan puhdastilan. Ilmanjakoa tutkittaessa ilmavirtaa visualisoitiin savulla ja ilman puhtautta mitattiin hiukkasmittarilla. HEPA-hajottajille suoritettiin ohivuototestit, jolla varmistettiin puhallettavan ilman puhtaus. Huoneelle suoritettiin painekoe, joka todensi tilan tiiviyden ja tila säädettiin ylipaineiseksi, jotta epäpuhtauksien kulkeutuminen huoneeseen estettiin. Tilasta mitattiin lämpötila, kosteus, ilmannoisuus, äänitasot ja leikkaussalille määritettiin puhtausluokka ISO-standardin mukaan. Leikkaussalille tehtiin myös palautumisajan määrittävä testi.</p> <p>Ilmanvaihtoratkaisua tutkittaessa havaittiin, että hajottajat ja suodattimet ovat tiiviitä eivätkä päästä hiukkasia tuloilman mukana tilaan. Mitattujen palautumisaikojen perusteella järjestelmä suodatti tehokkaasti tilassa syntyvät epäpuhtaudet. Mittauksissa havaittiin ylipaineisen leikkaussalin olevan lähes hiukkasvapaa ja saavuttavan ISO 3 -puhtausluokan. Ilmannoisuuksia tutkittaessa löydettiin suutinhajottajien asetelma, jolla ilmasuihku saatiin tasapainotettua huoneen keskipisteeseen. Tulosten perusteella ilmavirtoja todettiin voitavan laskea alkuperäisestä 2400 litrasta sekunnissa 2200 litraan sekunnissa tulevia leikkaussaleja varten.</p> <p>Suoritettut tutkimukset tehtiin kalustamattomassa leikkaussalissa. Tavanomaisesti leikkaussalissa olevien laitteiden ja henkilökunnan vaikutusta ilmavirtauksiin ei tutkittu. Salin hiukkaspitoisuuksia olisi mielenkiintoista tutkia simuloidussa leikkauksessa, jotta voitaisiin selvittää salin todellinen puhtausluokka leikkauksen aikana. Jatkotutkimuksena voitaisiin verrata sekoittavan ja laminaarisen ilmanjaon eroavaisuuksia. Tämä edellyttäisi mittausten suorittamista molemmilla ilmanjaoilla samoilla mittaolosuhteilla simuloituja leikkauspäästöjä käyttäen.</p>			
Asiasanat (avainsanat) Leikkaussali, ilmanvaihto, sekoittava ilmanjako, puhdastilat			
Sivumäärä 51(10)	Kieli Suomi	URN	
Huomautus (huomautukset liitteistä)			
Ohjaavan opettajan nimi Heikki Salomaa		Opinnäytetyön toimeksiantaja Halton Oy	

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis 28.11.2013	
Author(s) Veli Koskinen		Degree programme and option Building Services Engineering	
Name of the bachelor's thesis Examination of a ventilation system in an operating theatre			
Abstract <p>Operating theatres with high cleanliness requirements have conventionally been built with laminar air-flow ceilings and the rest with mixing airflow. For a new hospital in Sweden a new type of mixing airflow system was developed. The solution combined good filtration levels and high air exchange rate found in laminar airflow ceilings with the good air mixing ratio of a mixing airflow systems. Aim of my thesis is to examine and optimize the systems performance and determine the cleanliness class for an operating theatre it's been used at.</p> <p>For this research Halton Oy built a cleanroom at their factory in Kausala. The cleanroom corresponds an operating theatre designed for the new hospital. Examination of airflow was visualized by smoke and air cleanliness was measured with a particle counter. For each HEPA- diffuser an installed filter system leakage test were performed to verify cleanliness of the supplied air. The cleanroom was pressure tested for airtightness and the space was set to have an overpressure to prevent air impurities entering to the space. Air -temperature, -velocity, -humidity and sound levels were measured from the room. Test was also made to determine ISO classification number and recovery time for the operating theatre.</p> <p>Tests indicated that the diffusers and filters were properly installed and there were no particle leaks found. Measured recovery times also indicated systems ability to decrease particle levels effectively. Operating theatre was found to have very low particle concentration and achieving ISO 3 class classification number. When investigating airspeeds was such a diffuser nozzle configuration found that made the airflow to be focused in the middle of the room. Based on the results, airflows may be lowered from original 2400 l/s to 2200 l/s for the new hospitals operating theatres.</p> <p>Tests were made in an unfurnished operating theatre. Effects of personnel and equipment usually found in an operating theatre were not tested. It would be interesting to test the room's particle concentration in a simulated operation in order to determine theatres classification number at operational stage. For further investigation of airflows, it would be great to compare this mixing airflow solution to a laminar air-flow ceiling. In order to get comparable results, it would require tests to be made with same conditions and use of simulated particle emissions.</p>			
Subject headings, (keywords) Operating theatre, ventilation, mixing, cleanroom			
Pages 51(10)	Language Finnish	URN	
Remarks, notes on appendices			
Tutor Heikki Salomaa		Bachelor's thesis assigned by Halton Oy	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	LEIKKAUSSALI PUHDASTILANA	2
2.1	Määritelmä	2
2.2	Leikkaussalin ilmanvaihdon merkitys	2
2.3	Puhdastilaluokitus	4
3	LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHDON SUUNNITTELU	6
3.1	Lämpötila	7
3.2	Kosteus	7
3.3	Suodatus	8
3.4	Ulkoilmasäleiköt	11
3.5	Lämmöntalteenottolaitteet	12
3.5.1	Rekuperaattorit	12
3.5.2	Regeneraattorit	12
3.6	Kanavisto ja varusteet	12
3.7	Painesuhteet	13
3.8	Palautusilman käyttö	13
3.9	Ilmatiiveys	14
3.10	Ilmanvaihtokerroin	14
4	ILMANJAKOTAVAT	15
4.1	Sekoittava ilmanjakotapa	15
4.2	Laminaarinen ilmanjakotapa	17
4.3	Variaatiot	18
4.4	Aikaisemmat tutkimukset ilmanjakotavoista leikkaussaleissa	21
5	PUHDASTILAN RAKENTAMINEN	23
5.1	Tilan ilmanvaihtoratkaisu	23
5.2	Puhdastilan suunnittelu ja rakentaminen	25

6	LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHTOON LIITTYVÄT TESTAUKSET	27
6.1	Puhdastilan ilmanpitävyys	27
6.1.1	Tavoite	27
6.1.2	Menetelmät	27
6.1.3	Tulokset.....	29
6.1.4	Tulosten tarkastelu	29
6.2	Ilmanvaihtojärjestelmä ja painesuhteet.....	29
6.2.1	Tavoite	29
6.2.2	Menetelmät	29
6.2.3	Tulokset.....	31
6.2.4	Tulosten tarkastelu	32
6.3	HEPA-suodattimien ohivuototesti	32
6.3.1	Tavoite	32
6.3.2	Menetelmät	33
6.3.3	Tulokset.....	35
6.3.4	Tulosten tarkastelu	35
6.4	Äänenpainetasot.....	36
6.4.1	Tavoite	36
6.4.2	Menetelmät	36
6.4.3	Tulokset.....	36
6.4.4	Tulosten tarkastelu	37
6.5	Puhtausluokan määrittäminen.....	37
6.5.1	Tavoite	37
6.5.2	Menetelmät	38
6.5.3	Tulokset.....	38
6.5.4	Tulosten tarkastelu	39
6.6	Palautumisaika.....	40
6.6.1	Tavoite	40
6.6.2	Menetelmät	40
6.6.3	Tulokset.....	41
6.6.4	Tulosten tarkastelu	43
6.7	Huoneen termiset olosuhteet.....	44
6.7.1	Tavoite	44
6.7.2	Menetelmät	44
6.7.3	Tulokset.....	45

6.7.4	Tulosten tarkastelu	46
6.8	Ilman virtauskuviot	46
6.8.1	Tavoite	46
6.8.2	Menetelmät	46
6.8.3	Tulokset.....	47
6.8.4	Tulosten tarkastelu	47
7	YHTEENVETO	48
7.1	Työn johdosta tapahtunut kehitys	48
7.2	Jatkokehitys	49
	LÄHTEET	50

LIITTEET

- 1 Sairaalan ilmanvaihdon ohjeellisia suunnitteluarvoja
- 2 Leikkaussalin rengaskanavan mallinnus
- 3 Testihuoneen pohjapiirustus
- 4 Puhdastilan ilmatiiveystesti
- 5 Paineantureiden kalibrointi
- 6 Mittapisteet
- 7 Palautumisaika
- 8 Ilmannopeuksien kuvaajat

Lyhenteet

cfu	Colony-forming unit, pesäkkeen muodostava yksikkö (pmy)
EN	EU:n jäsenvaltioiden hyväksymä valmis EN-standardi
ISO	International Organization for Standardization
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter
ULPA	Ultra Low Penetration Air filter
µm	Mikrometri

1 JOHDANTO

Tavanomaisesti korkean puhtausluokan leikkaussalit on rakennettu laminaarikatoilla ja muut leikkaussalit perinteisellä sekoittavalla ilmanjaolla. Ruotsiin rakennettavaa sairaalaa varten, johon rakennetaan 40 leikkaussalia, kehitettiin uudentyyppinen ratkaisu. Ratkaisussa on yhdistetty laminaarivirtaukselle tyypilliset korkea ilmanvaihtokerroin ja korkea suodatusaste yhdessä sekoittavan ilmanjaon hyvän sekoitusasteen kanssa. Työni tarkoituksena on optimoida ratkaisun ilmanjaon tehokkuutta, tutkia sen toimivuutta leikkaussalissa ja selvittää, mihin puhtausluokkaan ratkaisulla ylletään.

Työ toteutettiin Halton Oy:n Kausalan tehtaan tiloissa, jonne rakennettiin puhdastila testiä varten. Puhdastila rakennettiin vastaamaan tulevan sairaalan leikkaussalia. Tilaa palvelee oma ilmanvaihtokone, ja leikkaussalissa on kierrätysilmayksikkö. Kierrätysilmakone luo tilaan suuren ilmanvaihtokertoimen ja 20 % ilmasta on raitisilmaa. Tila pidetään ylipaineisena muihin tiloihin nähden. Leikkausalueen yläpuolella on suutinhajottajista muodostettu kehä, jonka puhalluskuviota voidaan säätää. Hajottajat on varustettu HEPA-suodattimilla.

Tavoitteena ilmanvaihtoratkaisulla on ylittää tilaajan asettamiin arvot. Tavoitearvo salin mikrobipitoisuudelle on 5 cfu/m³. Mikrobiologinen pitoisuus ei itsessään käy suunnittelukriteeristä, mutta tutkimukset osoittavat, että noin 5 % isojen hiukkasten ($\geq 5\mu\text{m}$) lukumäärästä on pesäkkeen muodostavia yksilöitä [1, s. 12]. Täten tilan puhtausluokan tavoitteeksi saadaan ISO 5 -luokan leikkaussali. Muut tilan tavoitearvot on määritetty ruotsalaisen leikkaussaleja koskevan standardin SIS-TS 39:2012 mukaan [2].

Ilmavirtaa visualisoitiin savulla, ja hiukkasmittaukset suoritettiin käyttämällä hiukkasgeneraattoria yhdessä optisen hiukkaslaskurin kanssa. Tilasta mitattiin myös ilman ominaisuudet, kuten ilmannopeus, lämpötila ja kosteus. Leikkaussalin äänenpainetaso mitattiin desibelimittarin avulla.

2 LEIKKAUSSALI PUHDASTILANA

Puhdastilatekniikalla pyritään eliminoimaan haitallisten mikrobien ja hiukkasten aiheuttamia haittoja tuotantotiloissa ja laboratorioissa. Puhdastilan tarkoitus on suojata sekä ihmistä että tuotantoa. Sairaaloissa puhdastiloja ovat mm. sairaala-apteekit, leikkaussalit, eristys huoneet ja leikkausvälineiden huoltotilat [3, s. 23].

2.1 Määritelmä

"Puhdastila on huone, jossa ilman hiukkaspitoisuuksia valvotaan ja joka on rakennettu siten ja jota käytetään sellaisella tavalla, että hiukkasten pääsy, kerääntyminen ja säilyminen huoneen sisällä on minimoitu. Lisäksi muita asiaankuuluvia suureita, kuten lämpötilaa, kosteutta ja painetta, valvotaan tarpeen mukaan." [4, s. 6.]

2.2 Leikkaussalin ilmanvaihdon merkitys

Sairaalaympäristössä asetetaan hygienialle normaalia suuremmat vaatimukset. Laitoksissa hoidetaan usein heikkokuntoisia potilaita, joiden vastustuskyky on normaaliin verrattuna laskenut merkittävästi ja jotka voivat sairastua kohtalokkaasti bakteerien, sienien ja virusten aiheuttamiin tauteihin. Hyvin suunnitelluilla ja toimivilla ilmastointi- ja muilla LVI-laitteilla voidaan ratkaisevasti estää patogeenien bakteerien uhka kriittisillä alueilla, mutta väärin suunnitellut, asennetut sekä huolletut laitteet saattavat levittää tartuntoja. Varsinkin leikkaussaleissa on kiinnitetty huomiota toimintaan liittyvien bakteerien vähentämiseen. Sopivilla ilmanjako- ja suodatustavoilla on pystytty vähentämään niiden lukumääriä. [5, s. 8.]

Leikkausalueen infektiot ovat yleisin postoperatiivisten infektioiden muoto ja merkittävin kuolleisuuden aiheuttaja. Niihin liittyy itsenäinen 4,3 %:n kuolleisuuden lisäys. Infektion saaneen potilaan riski kuolla leikkausten jälkeen on yli kaksinkertainen verrattuna normaalisti toipuvaan potilaaseen. On arvioitu, että noin viidennes kaikista sairaalainfektioista olisi leikkausalueen infektoita. Leikkausalueen infektio jopa kolminkertaistaa sairaalahoidon kulut. Potilaalle tämä merkitsee myös selvästi pidentynyttä sairastamisaikaa, invaliditeettia ja kipua, jopa epäonnistunutta leikkaustulosta. Vuosittain Suomessa kirurgian liittyvien infektioiden kulujen on arvioitu olevan 100 - 200 miljoonaa euroa. [6, s. 233.]

Leikkausinfektion aiheuttaa epäpuhtaus, joka on peräisin joko potilaasta itsestään tai ympäristöstä. Suurin osa leikkaussali-ilman hiukkasista erittyy henkilökunnasta. Ihminen erittää päivässä n. 10 miljoonaa hiukkasta. Irtoavien hiukkasten määrä riippuu aktiivisuusasteesta; normaalissa kävelyliikkeessä irtoaa n. 10 000 hiukkasta minuutissa. [7, s. 4.]

Ainoastaan osa ilman sisältämistä hiukkasista voivat aiheuttaa infektion. Näitä hiukkasia kutsutaan mikro-organismeiksi eli mikrobeiksi. Mikrobit ovat eläviä pieneliöitä, eikä niitä voida havaita silmin. Niiden koon ilmaisemiseen käytetään yksikköä mikrometri (μm). Bakteerit ($0,5\text{--}5,0\ \mu\text{m}$) tai virukset ($0,01\text{--}0,2\ \mu\text{m}$) voivat kulkeutua ilman mukana joko erillisinä tai suurempiin hiukkasiin sitoutuneina. Niistä käytetään yhteisnimitystä pesäkkeen muodostava yksikkö (cfu, colony forming unit). Ihmisen erittämistä hiukkasista noin 10 % on pesäkkeen muodostavia yksiköitä. Keskimäärin neljä mikrobia on sitoutunut yhteen pesäkkeen muodostavaan yksikköön, jonka kokoluokka on $2\text{--}5\text{--}20\ \mu\text{m}$. [7, s. 4.]

Leikkausinfektion ehkäisytoimenpiteet ovat tärkeysjärjestyksessä [7, s. 4]:

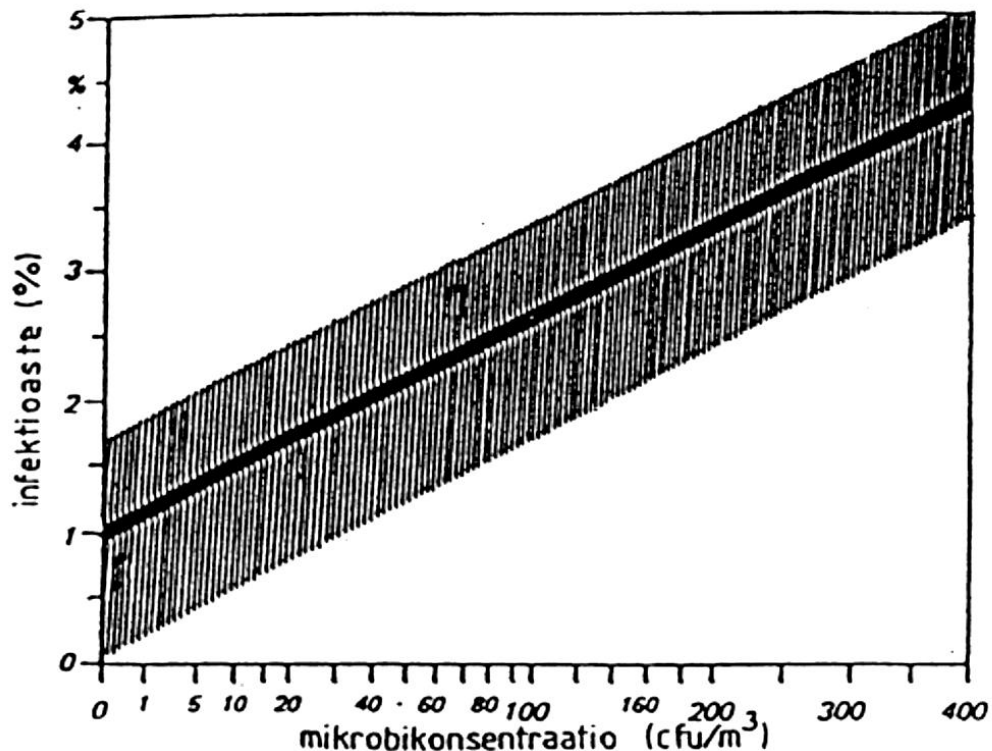
1. Leikkaustekniikka
2. Antibioottien oikea käyttö
3. Ilmanvaihtotekniikka.

Salin puhdastilatekniikka on erityisen tärkeä leikkauksissa, joissa ihmisvartaloon siirretään vieraita, biomateriaalista valmistettuja esineitä. Tällöin infektioriski on suurimmillaan. Näitä leikkauksia ovat neurokirurgiset, ortopediset, sydänkirurgiset ja tietyt mikrokirurgiset operatiot. Lonkkaproteesileikkauksissa on salin mikrobipitoisuuden osoitettu olevan suoraan verrannollinen leikkausten jälkeisten infektioiden määrään. [1, s. 11.]

Leikkausten jälkeiset toimenpidealueen infektiot aiheuttavat paljon haittaa ja kustannuksia, ja siksi niiden ehkäisyyn pitäisi panostaa oikein. Leikkaussalien ilmaston tekniikoiden tarkoituksena on minimoida ilman partikkelit ja siten ehkäistä infektioiden syntymistä. [8.] Tutkimusten mukaan 98 % suurten leikkausten yhteydessä leik-

kaushaavoihin päässeistä mikro-organismeista oli kulkeutunut niihin suoraan tai välillisesti ilmasta. [9.]

Leikkaussalin mikrobikonsentraation ja haavasta löydettyjen bakteerien määrän välillä on havaittu yhteys. Tutkimuksissa [10; 11] on osoitettu, että salin mikrobipitoisuus on suoraan verrannollinen infektiosteeseen; tekijöiden välinen suhde on esitetty kuvassa 1. [7, s. 6.]



KUVA 1. Salin infektioste mikrobipitoisuuden funktiona [11]

2.3 Puhdastilaluokitus

Ensimmäinen puhtausluokkia koskeva standardi FS 209 julkaistiin vuonna 1963 Yhdysvalloissa. Vuonna 1999 julkaistu kansainvälinen ISO-standardi kuitenkin korvasi vanhan FS 209 -standardin [12].

ISO-standardin puhdastilojen luokitus tapahtuu ilman hiukkaspitoisuuden ja -koon perusteella. Ilman suurin sallittu hiukkaspitoisuus C_n , määritetään yhtälön 1 mukaan. [4, s.10.]

Suurin sallittu hiukkaspitoisuus C_n määritetylle ISO-luokalle:

$$C_n = 10^N \times \left(\frac{0,1}{D}\right)^{2,08} \quad (1)$$

missä

C_n on suurin ilmassa sallittu pitoisuus hiukkasia (kpl/m³), jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin tarkasteltavana oleva hiukkaskoko. C_n pyöristetään lähimpään kokonaislukuun korkeintaan kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella.

N on ISO-luokitusnumero (> 0). ISO-luokkien välisiä luokituslukuja voidaan määritellä 0,1 pienimpänä sallittuna lisäyksenä

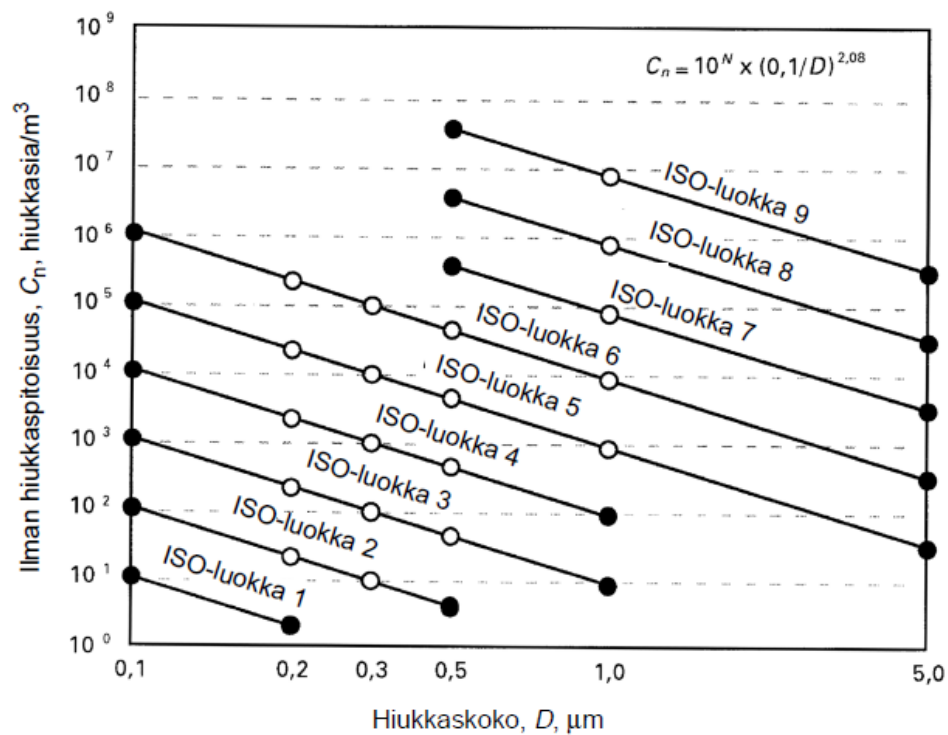
D on tarkasteltavana oleva hiukkaskoko mikrometreinä.

Taulukossa 1 ja kuvassa 2 on esitetty standardin SFS EN ISO 14644-1:2000 mukaiset eri puhtausluokkien pitoisuusrajat.

TAULUKKO 1. Hiukkaspitoisuusrajat valituille puhtausluokille [4, s. 8]

ISO luokitus numero (N)	Suurimmat hiukkaspitoisuusrajat (hiukkasia/m ³ ilmaa) hiukkasille, jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin alla esitetyt tarkasteltavat koot					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO luokka 1	10	2				
ISO luokka 2	100	24	10	4		
ISO luokka 3	1 000	237	102	35	8	
ISO luokka 4	100 000	2 370	1 020	352	83	
ISO luokka 5	1 000 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO luokka 6		237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO luokka 7				352 000	83 200	2 930
ISO luokka 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO luokka 9				35 200 000	8 320 000	293 000

HUOM. Mittausmenetelmiin liittyvät epätarkkuudet edellyttävät, että pitoisuusarvot esitetään ainoastaan kolmen numeron tarkkuudella luokitustasoa määrittäessä



KUVA 2. Valittujen ISO-luokkien pitoisuusrajojen graafinen esitys [4, s. 14]

3 LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHDON SUUNNITTELU

Leikkaussalin ilmanvaihdon tehtävänä on minimoida ihmisistä ja muista epäpuhtauslähteistä syntyvien mikrobien aiheuttamaa riskiä potilaalle sekä poistaa ilmaan mahdollisesti johtuvat anestesiakaasut. Leikkaussalin tuloilman tulee olla hyvin suodatettua ja ilmastointijärjestelmän tulee hallita sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Painesuhteet ympäröiviin tiloihin nähdessä kuuluisi olla säädettävissä. [1, s. 35.]

Suomessa leikkaussalien ilmanvaihdon suunnitteluun ei ole annettu tarkkoja viranomaismääräyksiä tai -ohjeita. Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D2 sanoo taulukossa 7, huomautuksella E: Erikoistilojen, kuten leikkaussalien, toimenpidehuoneiden, röntgentilojen, välinehuoltotilojen, potilaiden pesuun käytettävien tilojen jne. ilmanvaihto suunnitellaan tapauskohtaisesti.

Joitakin sairaalatilojen ilmastoinnin ohjeellisia suunnitteluarvoja on olemassa, ja lisäksi ulkomaalaiset määräykset ja standardit luovat hyvän pohjan suunnittelulle. Valmisteilla oli ollut Euroopan yhteinen sairaalan ilmanvaihtoa koskeva standardi, jonka

tärkeässä osassa oli leikkaussalien ilmanvaihto [13, s. 3], mutta erimielisyyksistä johtuen standardin valmistelu keskeytettiin, eikä standardia ole koskaan julkaistu.

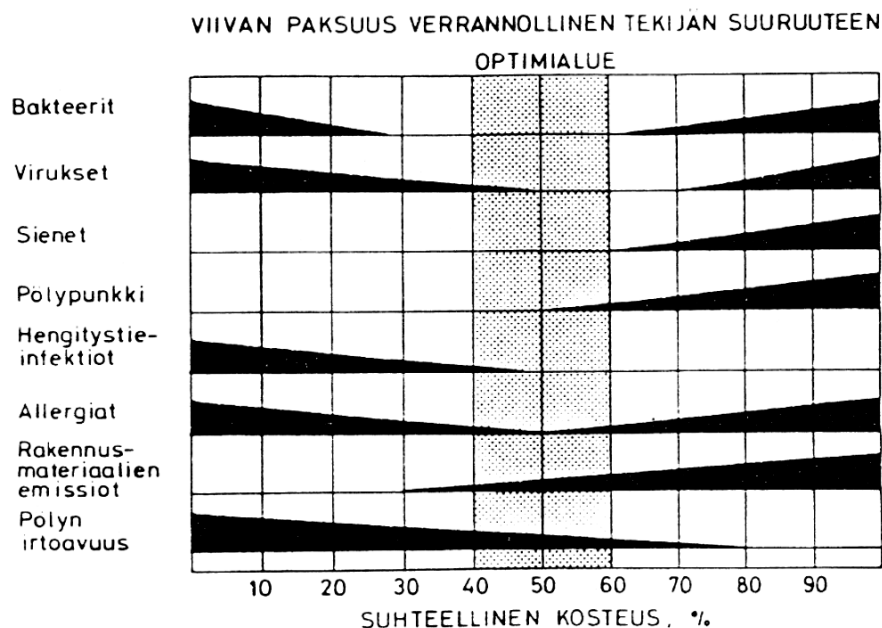
Sairaalatilojen ilmanvaihdon viitteellisiä ohjearvoja on annettu sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeissa [14]. Liitteessä 1 on esitetty ko. ohjeiden yhteenveto sairaaloiden puhdastilatyyppisten tilojen osalta.

3.1 Lämpötila

Leikkaussalin lämpö-olosuhteet on vaikea toteuttaa ristiriitaisten vaatimusten vuoksi. Kirurgin toiveena on kuiva ja viileä ilma hyvien työskentelyolosuhteiden kannalta, kun taas paikoillaan istuva anestesialääkäri voi pitää olosuhteita liian kylmänä. Tärkeimpänä on kuitenkin potilas, joka tarvitsee lämpimät olosuhteet, jolloin keho toimii parhaiten. [9.] Leikkaussalin lämpötilan suositusarvona voidaan pitää $22 \pm 3 \text{ °C}$ [6, s. 261; 1, s. 13].

3.2 Kosteus

Ilman suhteellinen kosteus on ilmassa olevan veden höyrypaineen suhde vesihöyryn kyllästymispaineeseen samassa lämpötilassa. Huoneilman kosteudella on monia välillisiä ja välittömiä vaikutuksia. Puhtaan ilman alhainen kosteus ei aiheuta oireita terveellä ihmisellä, mutta allerginen ihminen voi saada oireita samoissa olosuhteissa. Hengitysilman epäpuhtauksilla on suurempi terveyshaitta huoneilman ollessa kuivaa. [15.] Kuvasta 3 voidaan havaita kosteuden optimialue, 40 – 60 %, jolloin suhteellisesta kosteudesta ilmenee vähiten haittoja. Suhteellisen kosteuden suositus leikkaussaleissa on $35 - 45 \% \pm 10 \%$ [6, s. 261; 1, s.13].



KUVA 3. Yhteenveto ilman kosteuden vaikutuksista [1, s. 29]

Kostutusratkaisuista paras on höyrykostutin. Kiertovesikostuttimiin liittyy kontaminaatio-ongelma, minkä vuoksi kiertovettä ei suositella. Kostutuslaitteet tehdään siten, etteivät ne oikein huollettuina huononna huoneilman laatua. Kostutin sijoitetaan siten, ettei siitä pääse pisaroita kanavistoon eivätkä kostuttimien jälkeiset suodattimet kastu missään olosuhteissa. Tuloilman kostutus tulee kostuttimien jälkeen olla riittävän alhainen (max. 80 – 90 %), jottei kondenssia suodattimissa tapahdu. Kostuttimessa käytettävän veden laatu tulee täyttää juomavesivaatimukset, eikä se saa sisältää terveydelle vaarallisia lisäaineita. [5, s. 14.]

3.3 Suodatus

Yleisesti käytettävät ilmansuodattimet jaetaan neljään ryhmään niiden erottelukyvyn mukaisesti. Suomessa käytetään eurooppalaisten standardien EN 1822:2009 ja EN 779:2002 mukaisia luokitteluja. Standardi jakaa suodattimet karkea-, hieno-, HEPA- ja ULPA-suodattimiin, joiden kirjaintunnukset ovat G, F, H ja U.

Karkeasuodattimet tehdään progressiivisesta muovikuitukankaasta, jolla on suuri pölynsitomiskyky. Karkeasuodattimia käytetään yleisesti esisuodattimena poistamaan ilmasta kooltaan suurimmat hiukkaset ennen hienosuodatinta. Luokituksessa käytetty karkeasuodattimen prosenttiluku kertoo, kuinka suuri osa testissä käytetystä hiukkas-
massasta on jäänyt suodattimeen. [16, s.9.]

G1 = 50 % - 65 %
 G2 = 65 % - 80 % Erotusaste hiukkasmassasta
 G3 = 80 % - 90 %
 G4 > 90 %

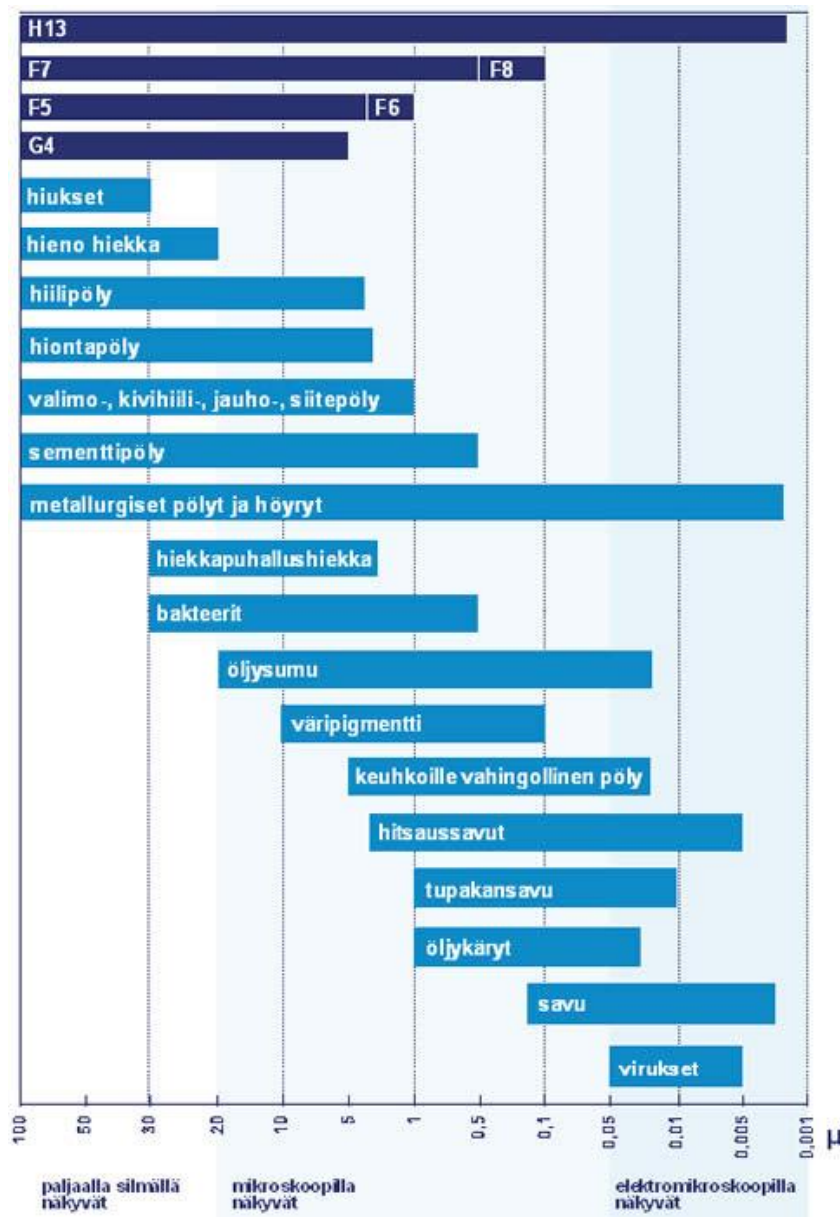
Hienosuodattimet toimivat usein rakennuksen pääasiallisena suodattimena ja suodattina käytetään joko esisuodattimen kanssa tai ilman. Hienosuodattimia käytetään myös poistoilman suodattimina, poistoilmasuodattimen tarkoitus on pitää ilmanvaihtokone puhtaana. Rakennuksissa yleisimmin käytetty hienosuodatinluokka on F7. Hienosuodattimet valmistetaan yleensä paperista, polyesteristä tai erilaisista tekstiileistä, kuten kuitukankaasta. Hienosuodattimien prosenttiluku kertoo, kuinka suuri osa yli 0,4 µm hiukkasista on jäänyt suodattimeen. [16, s. 9.]

F5 = 40% - 60%
 F6 = 60% - 80%
 F7 = 80% - 90% > 0,4 µm hiukkasista pysähtyy suodattimeen.
 F8 = 90% - 95%
 F9 > 95%

HEPA-suodattimet (High Efficiency Particulate Air filter) ja ULPA-suodattimet (Ultra Low Penetrate Air filter) ovat erittäin korkean erotteluasteen omaavia suodattimia. Niitä kutsutaan myös mikrosuodattimeksi tai absoluuttisuodattimeksi. [17.] Suodattimen materiaali voi olla esimerkiksi paperia, jossa materiaalin kuidut ovat sekaisessa matriisirakenteessa [16, s. 10]. HEPA- ja ULPA-suodatinluokituksen prosenttiluku kertoo, kuinka suuri osa kaikkein tunkeutuvimmista hiukkasista (0,3 µm) pysähtyy suodattimeen.

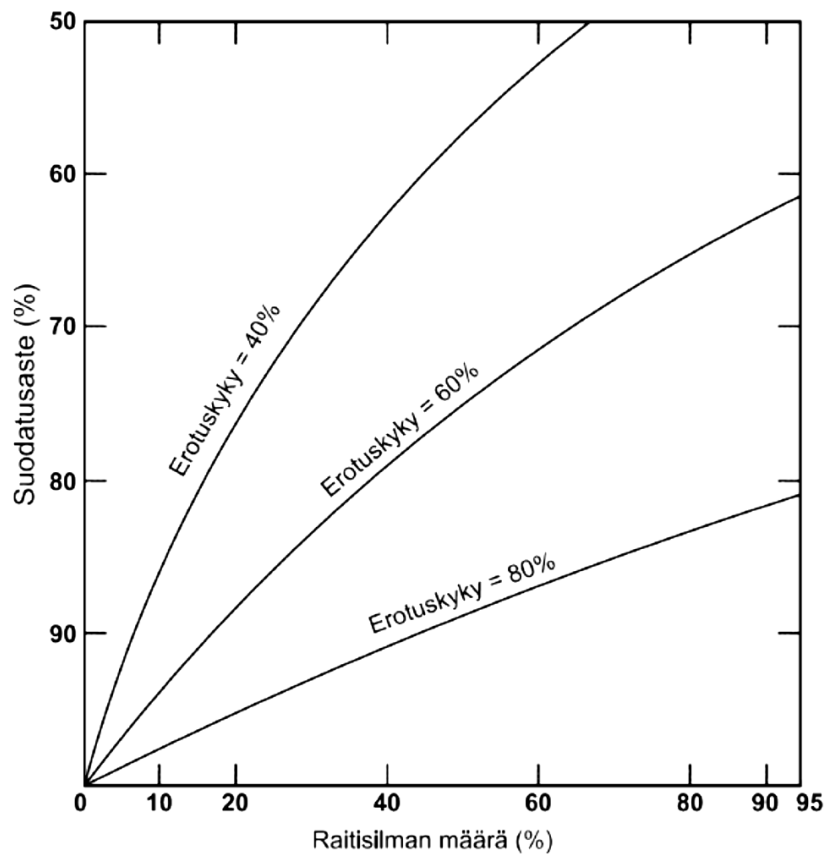
H10 > 85%
 H11 > 90%
 H12 > 99,5%
 H13 > 99,95%
 H14 > 99,995% 0,3 µm hiukkasista pysähtyy suodattimeen.
 U15 > 99,9995%
 U16 > 99,99995%
 U17 > 99,999995%

Kuvassa 4 on esitetty suodatinluokkien suodatusteho erikokoisten hiukkasten suodattukseen sekä esimerkkejä erilaisten hiukkasten partikkelikoosta.



KUVA 4. Hiukkaskoko (μm) ja suodatinluokat [18]

Leikkaussalin tuloilma suodatetaan yleensä kolmessa vaiheessa karkea-, hieno- ja mikrosuodattimella, joista viimeinen suodatin tulisi asentaa mahdollisimman lähelle itse puhdasta tilaa. Infektioita aiheuttavien hiukkasten, joista valtaosa on suurempia kuin 2 μm, keskikooltaan 8 μm ja jotka laskeutuvat alle 30 cm minuutissa poistoon riittää F8-luokan suodatin. Kierrätysilmaa käytettäessä tulee myös suojata tilakohtaista laitteistoa ja vähentää loppusuodattimen kuormitusta käyttämällä palautusilmasuodatinta. [5, s. 11.] Kuva 5 kuvaa suodattimen suodatustehoa kierrätysilmakoneessa, jossa vain osa suodattimelle tulevasta ilmasta on raitisilmaa.



KUVA 5. Suodattimen teoreettinen suodatusaste yhdellä suodatuskerralla. Kuvan alin viiva (80 %) kuvaa suurin piirtein suodatinta F7 [19, s. 39].

Leikkaussalien suositukset suodatukselle löytyvät liitteestä 1. Kyseinen ohjeistus suosittelee käytettäväksi kolmiportaista suodatusta F5, F8 ja H12. Myös muiden maiden suositukset leikkaussalien suodatukselle ovat samankaltaisia. Saksa G4, F7 ja H12; Itävalta F5, F8 ja H12; USA G3, F8 ja H12 [5, s.44].

3.4 Ulkoilmasäleiköt

Ulkoilmasäleikön tulisi suodattaa lunta ja vettä, jolla estetään suodattimien kastuminen. Suomessa esiintyy usein ulkoilmasäleikköjen umpeen jäähtymistä esim. alijäähtyneen sadeveden vuoksi. Tämä on estettävissä raitisilmasäleikköön asennettavilla sähköisillä lämpövastuksilla. [5, s. 16.] Ulkoilman imuaukon pitää sijaita vähintään 3 metrin korkeudella, jotta maahan kerääntyneet mikro-organismit ja pöly eivät pääsisi ilmankäsittelylaitteistoon, myös kattojen ja muiden vaakasuorien pintojen läheisyydessä on säilytettävä riittävä etäisyys ulkoilma-aukkoon. [5, s. 64.] Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 on annettu minimietäisyydet jäteilma-aukoista ja muista mahdollisista epäpuhtauslähteistä.

3.5 Lämmöntalteenottolaitteet

Lämmöntalteenottolaitteet olisi hyvä sijoittaa virtaussuunnassa ennen ensimmäistä suodatinta, jolla estetään lumihaittojen syntyminen talviolosuhteissa. Tämä kuitenkin soveltuu vain helposti puhdistettaville lämmöntalteenottoratkaisuille ja muissa ratkaisuissa lämmöntalteenotto sijoitetaan virtaussuunnassa suodatuksen jälkeen. Lämmöntalteenottolaitteiden rakenne ja painesuhteet toteutetaan siten, ettei poistoilmaa siirry tuloilmaan.

3.5.1 Rekuperaattorit

Rekuperaattorit ovat laitteita, joissa ilman siirtymistä tulo- ja poistoilman välillä ei tapahdu ja näitä voidaan käyttää rajoituksetta. Nestekiertoisista rekuperaattoreista neulaputkipatteri sijoitettuna suoraan ulkoilma-aukkoon estää lumen pääsyn kanavistoon ja nostaa tuloilman lämpötilan yli kastepisteen. Täten se myös pienentää imukammion sedimentoitumistilan tarvetta. [5, s. 15.]

3.5.2 Regeneraattorit

Regeneraattoreiden käytöstä on montaa eri käytäntöä maiden välisissä säädöksissä. Useimmat maat hyväksyvät regeneraattoreiden käytön tietyin ehdoin. Usein ehdot koskevat siirtyvän poistoilman määrää tuloilmassa ja kosteuden siirtyminen tulee tapahtua ilman pisarointia.

3.6 Kanavisto ja varusteet

Sairaaloiden ilmanvaihtokanavamateriaaliksi soveltuu sinkitty teräs [5, s.16]. Kanaviston tulee olla riittävänä tiivis, jolla estetään epäpuhtauksien pääsy kanavistoon tai infektioleikkauksissa kanavista ympäröiviin tiloihin. Kanavat tulee puhdistaa pölystä ja rasvasta ennen käyttöönottoa, kanavat on varustettava tarkastusluukuilla puhdistusta ja tarkastusta varten. Pölyä kertyy paikkoihin, joissa ilman nopeus on vähäinen (alle 2,5 m/s). [5, s. 62.]

Äänenvaimentimina tulisi käyttää vaimentimia, joista ei irtoa hiukkasia tuloilmaan, esim. dacron vaimentimia ja ne on asennettava virtaussuunnassa ennen viimeistä suodatinta.

Tulo- ja poistoilmaelimien pitää olla helposti puhdistettavissa ja desinfioitavissa. Ne on valmistettava sileästä kulutusta ja korroosiota kestävästä materiaalista, eikä niiden säädöt saa olla liian helposti muutettavissa.. Poistoilman mukana kulkeutuu paljon nukkaa, joten poistoilmaelimet on syytä varustaa nukkaa erottavalla suodattimella, joka on helposti irrotettavissa. [5, s 64.]

3.7 Painesuhteet

Hiukkasten liikettä tilojen välillä hallitaan paine-erojen avulla. Tila, jonka täytyy pysyä puhtaana, suunnitellaan ylipaineiseksi, jolloin ilman virtaussuunta ja epäpuhtauksien kulkeutuminen on puhtaammasta tilasta vähemmän puhtaampaan. Ylipaine saadaan aikaan ilmanvaihdon avulla syöttämällä suurempi määrä ilmaa huoneeseen kuin sieltä poistetaan. Puhtaita leikkauksia varten tarkoitettu sali suunnitellaan ylipaineiseksi ja infektiroleikkauksissa alipaineiseksi ympäröiviin tiloihin verrattuna [1, s.13].

Lämpötilaerosta johtuva paine-ero aiheuttaa virtauksen oviaukoissa. Yhden asteen lämpötilaero aiheuttaa n. 100 l/s termisen virtauksen 0,8 m x 2,0 m kokoisessa oviaukossa. Salin ja muun leikkausosaston väliin rakennettavat sulkutilat estävät ilmavirtauksen kulkeutumisen tilasta toiseen pienestä lämpötilaerosta riippumatta. [5, s 70.]

Standardin ISO 14644-4:2001 mukaan optimaalinen paine-ero on 5 – 20 Pa, jolloin ovien avautuminen ei vaikeudu ja vältetään turhia ilman pyörteilyä. Yli 30 Pa:n paine-ero voi aiheuttaa vihellystä ilman virratessa rakenteiden raoista ja ovien avautuminen ja sulkeutuminen saattaa hankaloitua [20, s. 13].

3.8 Palautusilman käyttö

Leikkaussalin ilma poistetaan yleensä sekä salin ala- että yläosasta. Yläpoistojen kautta kulkeva ilmavirta on noin 20 - 30% salin kokonaispoistoilmavirrasta. Anestesiakäsujen poistamiseksi tulee salin ilmanvaihtokertoimen olla vähintään 17 1/h. Potilaan uloshengittämä kaasu on ympäröivää tilaa lämpimämpää. [5, s.38.] Tästä johtuen on

palautusilman käyttö suositeltavaa tilan alaosaan. Nykyisin kuitenkin anestesiakaasut syötetään suoraan henkitorveen hengityskoneen välityksellä, joten huoneilmaan ei suuria määriä kaasuja pääse kulkeutumaan.

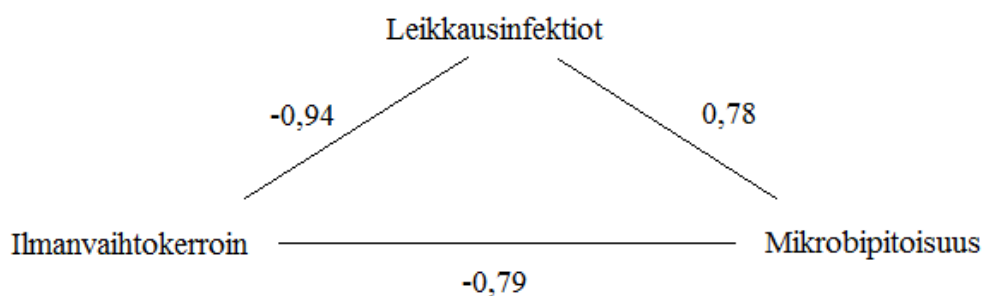
3.9 Ilmatiiveys

Leikkaussalin ilmanvaihdon hyvä hallinta vaatii, että huone on rakennettu mahdollisimman ilmatiiviiksi. Vuotoilmavirtaa $0,4 \text{ l/s, m}^2$ 50 Pa ali- tai ylipaineella pidetään riittävänä tiiveysvaateena. Tämä voi olla kuitenkin vaikea saavuttaa tavanomaisilla kevyillä väliseinillä ja kalliimpia metallisia moduuliseiniä tarvitaan. Modulaaristen seinien etuna on rakentamisen nopeus ja se, että ne voidaan rakentaa ilman suurta viimeistelyä ja pölyä. Valittaessa seinäelementtejä onkin tärkeää tehdä riskianalyysi ja konsultoida asiakasta sekä rakenne- ja LVI-suunnittelijaa. [2, s. 13.]

3.10 Ilmanvaihtokerroin

Ilmanvaihtokerroin kuvaa, kuinka monta kertaa huoneen ilma vaihtuu aikayksikköä kohden, yleensä yksikkönä käytetään x- kertaa tunnissa (1/h). Ilmanvaihtokerroin lasketaan jakamalla huoneeseen tuleva ilmavirta (m^3/h) huoneen tilavuudella (m^3).

Tutkimuksessa [21] on käsitelty useiden tutkimusten tuloksia ja selvitetty näiden perusteella ilmanvaihtokertoimen, leikkausinfektioiden ja ilman mikrobipitoisuuden keskinäisiä vaikutussuhteita. Näiden välisiä korrelaatioarvoja ei voida kuitenkaan pitää suorina syy-seuraus-suhteina, koska tutkimuksissa ei ole testattu suodattimen tehokkuuden, tuloilmavirran suuruuden tai ilmavirtojen suuntauksen vaikutusta mikrobipitoisuuteen. Kuvassa 6 on esitetty yllä mainittujen tekijöiden korrelaatioarvot.



KUVA 6. Leikkausinfektioiden, ilmanvaihtokertoimen ja salin mikrobipitoisuuden väliset korrelaatioarvot [7, s. 29]

Tutkimuksen mukaan kaikkien kolmen tekijän vastaavuussuhteiden arvot ovat erittäin suuret. Erityisesti on huomattava leikkausinfektioiden esiintymisen ja ilmanvaihtokertoimen välinen suuri korrelaatio. Ilmanvaihtokertoimen ja mikrobipitoisuuden välinen korrelaatio ei johdu ainoastaan ilmanvaihtokertoimesta, vaan myös suodattimien tehokkuudesta ja ilmanjakotavasta. Mikrobipitoisuuden ja leikkausinfektioiden määrän välinen korrelaatio osoittaa, että alhaisempi mikrobipitoisuus takaa pienemmän infektioprosentin. [1, s. 32.] Tutkimuksessa [7] onkin todettu, että leikkaussalin ilmanvaihtokerroin on kääntäen verrannollinen leikkausalueen keskimääräisiin mikrobipitoisuuksiin.

4 ILMANJAKOTAVAT

Leikkaussalin ilmanjakotavat voidaan karkeasti jakaa kahteen ääritapaukseen: sekoittavaan ja laminaariseen järjestelmään. Sekoittava järjestelmä perustuu ilman epäpuhtauspitoisuuksien laimentamiseen ja laminaarinen perustuu ilman syrjäytykseen. [1, s. 39.]

4.1 Sekoittava ilmanjakotapa

Sekoittavassa ilmanjaossa pyritään ilman epäpuhtauspitoisuuden laimentamiseen. Kuvassa 7 on esitetty sekoittavan ilmanvaihdon ideaalitilanne, jossa saavutetaan täydellinen ilman sekoittuminen. Tilan mikrobipitoisuus riippuu epäpuhtauslähteen voimakkuudesta ja tuloilmavirran suuruudesta. [1, s. 39.]

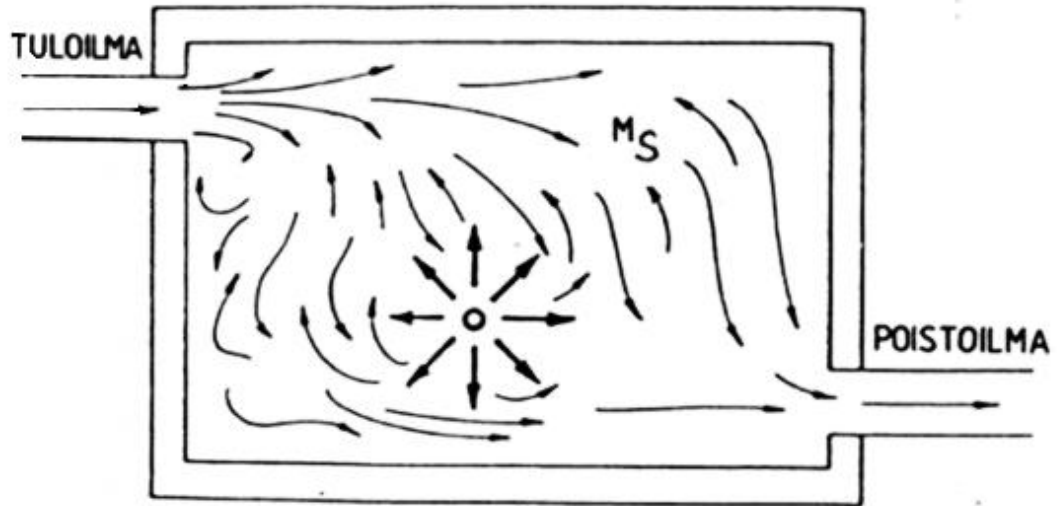
Sekoittavan leikkaussalin mikrobipitoisuus voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$M_s = \frac{E}{V_t} \quad (2)$$

missä

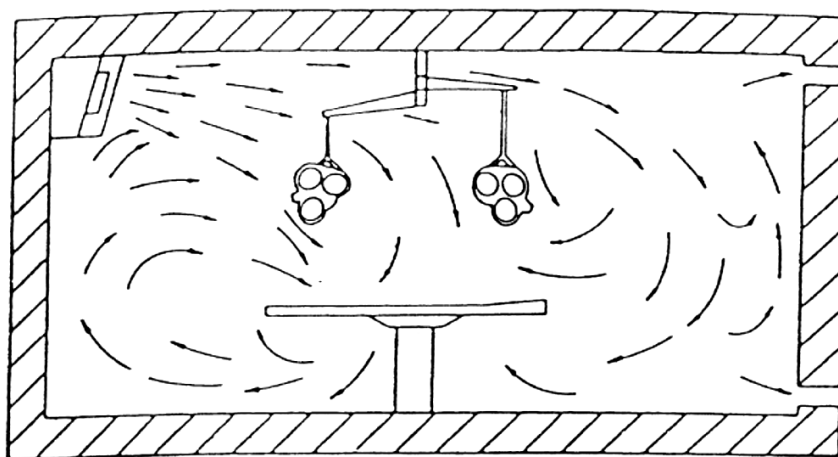
M_s	on mikrobipitoisuus (cfu/m ³)
E	on epäpuhtauslähteen voimakkuus (cfu/h)
V_t	on tuloilmavirta (m ³ /h)

Mikrobipitoisuus M_s pienenee lineaarisesti tuloilmavirran kasvaessa tai epäpuhtauslähteen voimakkuuden pienetessä. Epäpuhtauksien suuruus riippuu suurimmaksi osaksi leikkaushenkilökunnan käyttämästä suojavaatetuksesta ja aktiivisuusasteesta. [1, s. 39.]

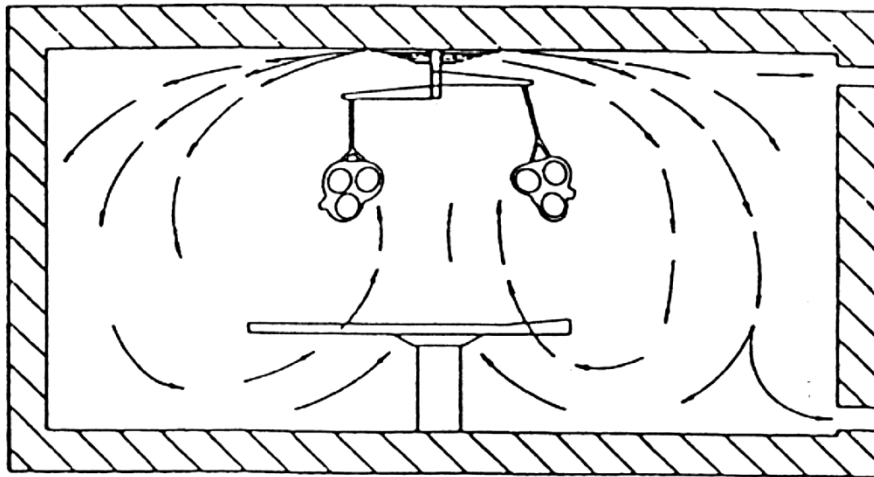


KUVA 7. Leikkaussalin mikrobipitoisuus ideaalisen sekoituksen tapauksessa [1, s. 39]

Kuvissa 8 ja 9 on esitetty yleisesti käytettyjä sekoittavia ilmanjakotapoja. Tuloilma johdetaan katonrajasta tai leikkauspöydän yläpuolelta ja poistetaan seinän ala- ja yläosassa olevien säleiköiden kautta. Näillä järjestelmillä päästään suhteellisen lähelle ideaalista sekoitusta, jolloin mikrobipitoisuus riippuu eniten tuloilmavirrasta. [1, s. 40.]



KUVA 8. Sekoittava ilmanjakotapa, puhallus katonrajasta [1, s. 40]



KUVA 9. Sekoittava ilmanjakotapa, puhallus leikkauspöydän yläpuolelta [1, s. 40]

4.2 Laminaarinen ilmanjakotapa

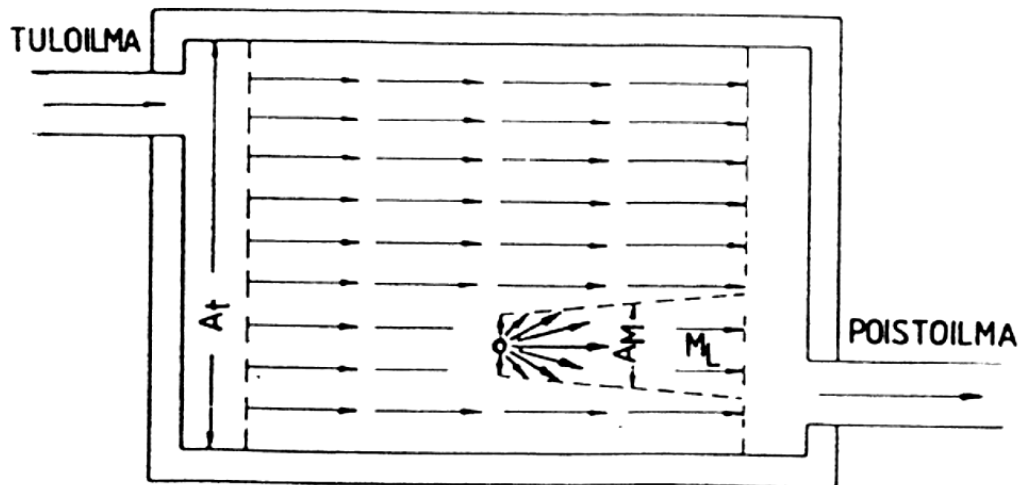
Laminaarisessa ilmanjaossa tilan puhtaus perustuu ilman syrjäytykseen mäntävirtauksella. Mikrobit esiintyvät ainoastaan epäpuhtauslähteestä irtoavien hiukkasten muodostamalla alueella (kuva 10). Mikrobipitoisuus määritetään kaavan 3 avulla:

$$M_L = \frac{A_t}{A_M} * \frac{E}{V_t} \quad (3)$$

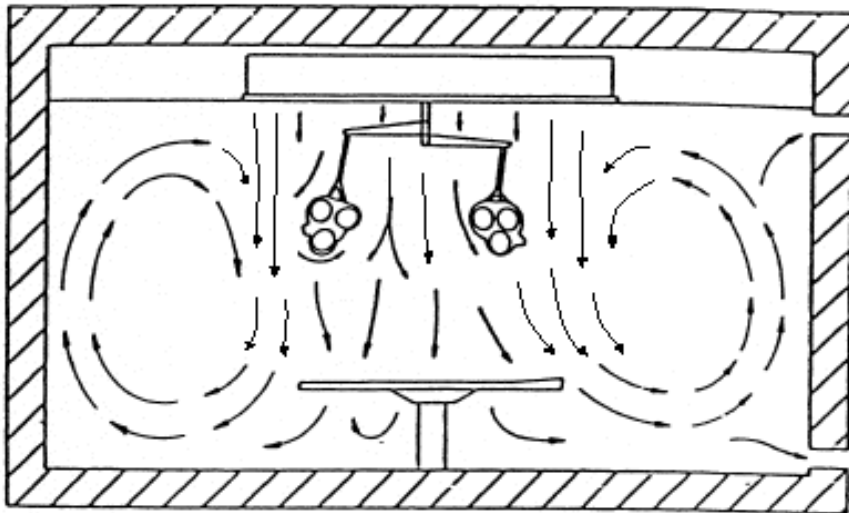
Missä:

M_L	on mikrobipitoisuus (cfu/m ³)
A_t	on tilan poikkipinta-ala (m ²)
A_M	on mikrobialueen poikkipinta-ala (m ²)
E	on epäpuhtauslähteen voimakkuus (cfu/h)
V_t	on tuloilmavirta (m ³ /h)

Laminaarinen ilmanjaolla saadaan aikaan suunnattu virtaus, jolla kyetään hallitsemaan leikkaushenkilökunnan aiheuttamia turbulenttisia pyörteitä. Ihmisen aiheuttama ylöspäin suuntautuva konvektiovirtauksen nopeus on n. 0,5 m/s, joten laminaarikaton virtauksen pitäisi olla tätä suurempi. [1, s. 42.] Kuvassa 11 on esitetty perinteisen laminaarivirtauskaton toiminta.



KUVA 10. Leikkaussalin mikrobipitoisuus ideaalisen syrjäytyksen tapauksessa [1, s. 42]

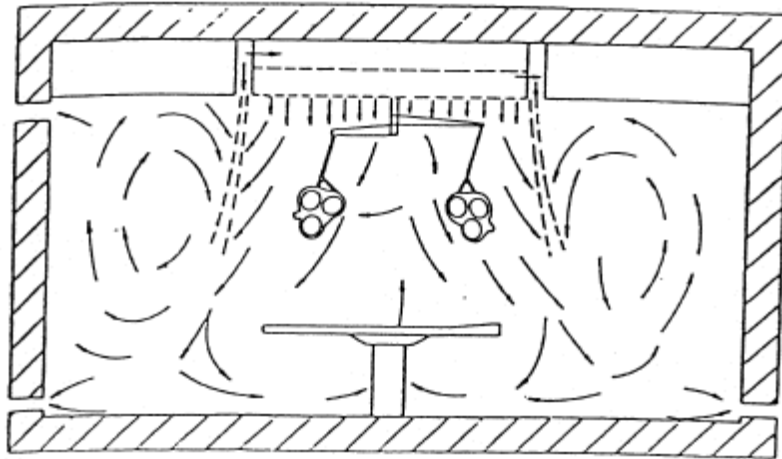


KUVA 11. Perinteinen laminaarivirtauskatto [1, s. 43]

4.3 Variaatiot

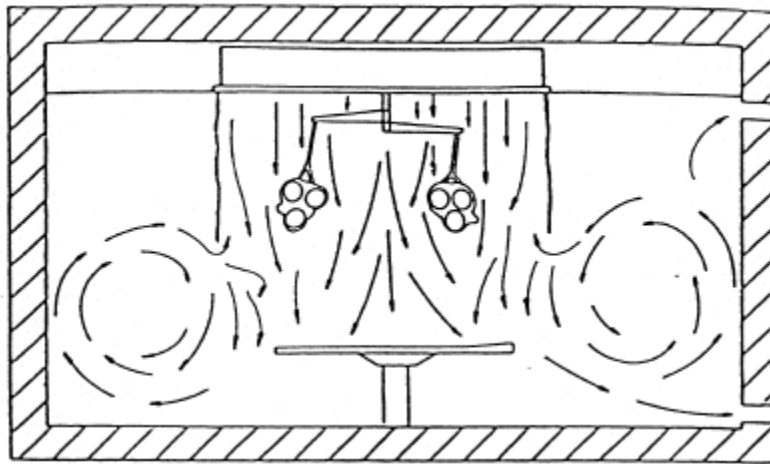
Leikkaussaleja varten on kehitetty erilaisia järjestelmiä, jotka koostuvat sekä laminaarisesta että sekoittavasta osasta.

Ruotsalaisessa Allander-ilmanjakotavassa tuloilma rajataan katon reunoilta puhallettavien tukisuihkujen avulla (kuva 12). Nämä suihkut muodostavat ilmaverhon, jonka nopeus on suurempi kuin alueen sisään jäävän tuloilman nopeus. [1, s. 43.]



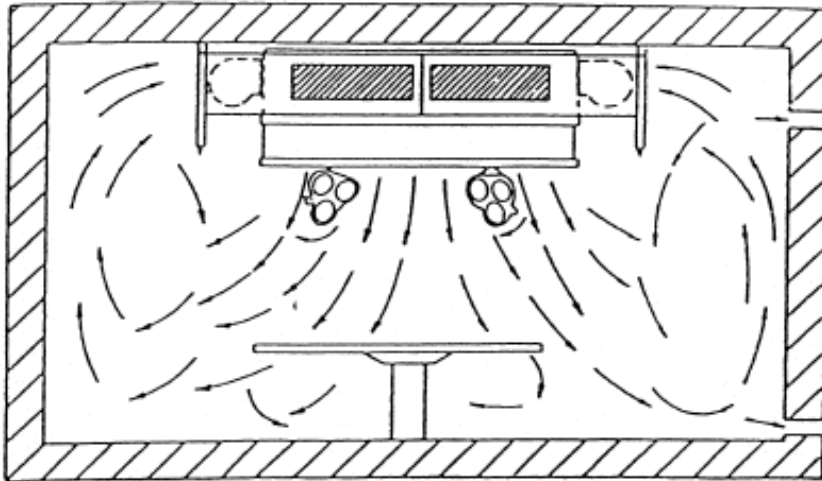
KUVA 12. Allander-järjestelmä. [1, s. 43]

Huoneilman sekoittuminen tulovirtaukseen voidaan estää myös asentamalla pitkät levyt laminaarikaton sivuille (kuva 13). Sivulevyt haittaavat kuitenkin leikkausryhmän työskentelyä ja huoneilmaa pääsee sekoittumaan tulovirtaukseen levyjen alapuolella. Jos ilmannoisuus keskiosassa on suhteellisen pieni, eikä se pysty kumoamaan valaisimista ja ihmisistä aiheutuvia konvektiovirtauksia, aiheuttaa tämä ilmavirtauksen salin alaosa leikkausalueelle. [1, s. 44.]



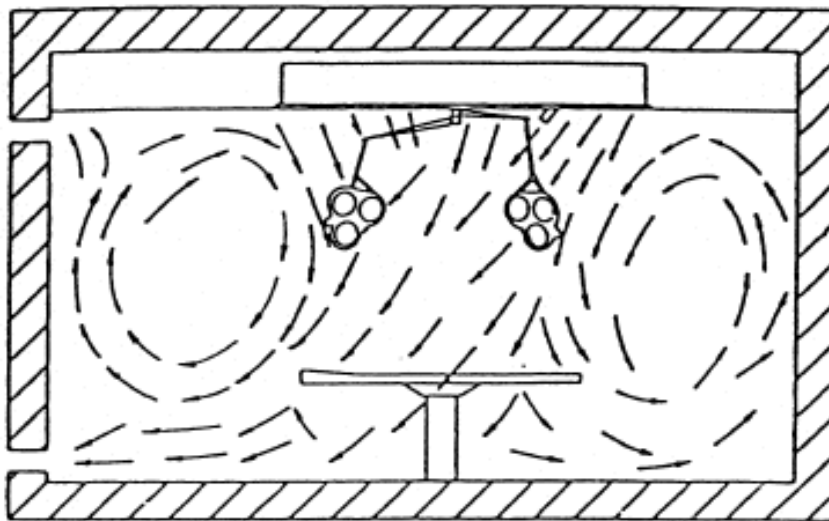
KUVA 13. Puhallus rei'itetyn katon läpi, sivulevyillä [1, s. 44]

Kuvassa 14 on esitetty Englantilainen Charnley – Howorth -katto, jossa salin ilmaa kierrätetään katossa olevien puhaltimien kautta. Tällä järjestelmällä saavutetaan pieni mikrobipitoisuus leikkausalueella, koska tuloilmasuihkulla on huomattava syrjäyttävä vaikutus. Suihkun nopeus on n. 0,5 m/s. [1, s. 44.]



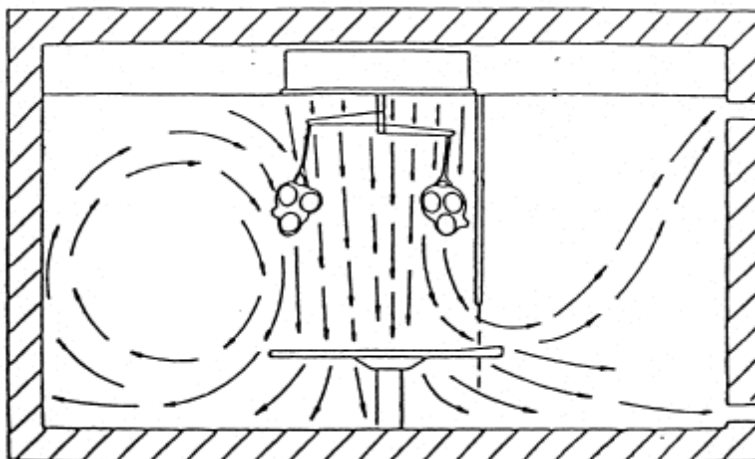
KUVA 14. Charney – Howorth -järjestelmä [1, s. 44]

Saksalaisessa Weiss-järjestelmässä (Kuva 15) tuloilmakattoon on asennettu kaksi tukisuihkua, joilla alaspäin suuntautuva virtaus on pyritty saamaan tasaiseksi, jolloin ympäröivän sisäilman sekoittuminen tuloilmavirtaukseen on vaikeampaa. Tukisuihkujen heittopituus ylettyy leikkauspöydälle asti. [1, s. 45.]



KUVA 15. Weiss-järjestelmä [1, s. 45]

Sveitsiläisessä Allo Pro -ilmanjakotavassa (kuva 16) anestesiahenkilökunta on erotettu muusta henkilökunnasta suojalevyllä, jolloin toisella puolella syntyvät anestesiakaasut poistuvat pääsemättä salin puhtaammalle puolelle.[1, s. 46.]



KUVA 16. Allo Pro -järjestelmä [1, s. 46]

4.4 Aikaisemmat tutkimukset ilmanjakotavoista leikkaussaleissa

Vuonna 1988 julkaistussa tutkimuksessa [7] tutkittiin leikkaussalin mikrobi- ja hiukkaspitoisuutta eri ilmanjakotavoilla. Mittaukset tehtiin toiminnan aikana neljässä eri leikkaussalissa, joista kahdessa oli laminaarinen ja kahdessa sekoittava ilmanjako.

Tutkimuksessa laminaarisella ilmanjakotavalla varustetuissa saleissa saavutettiin pienempi mikrobipitoisuus kuin sekoittavan ilmanjaon saleissa. Tuloksissa havaittiin myös ilmanvaihtokertoimen korreloivan mikrobiologista puhtautta. Tuloksia ei voida kuitenkaan pitää täysin vertailukelpoisina, koska tiloissa vallitsi erilaiset mittausolosuhteet. [7.]

VTT suoritti vuonna 2012 tutkimuksen [3] liittyen ilman hiukkaspitoisuuksiin leikkausosastoilla. Tavoitteena oli tutkia tilojen ilman hiukkaspitoisuutta, painesuhteita ja staattisen sähkön hallintaa. Tutkimuksessa tehtiin mittauksia neljässä laminaarisella ja kahdessa sekoittavalla ilmanjaolla toimivista leikkaussaleista lepotilassa. Toiminnan aikana tehtiin hiukkaspitoisuusmittauksia kahdessa laminaarisella ja yhdessä sekoittavalla ilmanjaolla varustetussa leikkaussalissa.

Tuloksissa havaittiin, ettei suurta eroa puhtausluokissa syntynyt ilmanjaon suhteen, mutta merkittävänä vaikutuksena pidettiin tilojen välisiä painesuhteita sekä operaation ja henkilökunnan aiheuttamia päästöjä. [3, s. 39.]

Saksassa suoritettiin tutkimus [22] vuosina 2000 - 2004, jossa vertailtiin sekoittavan ja laminaarisen ilmanjaon vaikutusta leikkausinfektioiden määrään. Molemmat ilmanjakotavat oli varustettu HEPA-suodatuksella. Tutkimukseen osallistui 63 kirurgian osastoa, joista jokaisessa suoritettiin vähintään 100 toimenpidettä. Tutkimustulokset kerättiin yhteensä 99 230 leikkauksesta, joista 1901 esiintyi leikkausalueen infektio.

Tuloksista havaittiin, että ilmanjaolla ei ollut suurta vaikutusta polviproteesi- ja vatsanseudun leikkauksissa, mutta vastoin odotuksia laminaarinen ilmanjako lisäsi leikkausalueen infektioiden määrää lonkkaproteesileikkauksissa verrattuna sekoittavaan ilmanjakoon. Tutkimuksessa pohdittiin mahdollisia syitä tuloksille. Mahdollisina syinä pidettiin potilaan jäähtymistä sekä kirurgiahenkilökunnasta irtoavia hiukkasia, kun he ovat haavan yläpuolella ilman virratessa suoraan alaspäin. [22.]

Tulos herätti paljon keskustelua. Suurin kritiikin aiheista oli, että tutkimuksessa ei ollut huomioitu laminaarikaton kokoa. Kritiikin johdosta ryhmä päätti uusia tutkimuksen ottaen huomioon laminaarikaton koon. Tutkimus toteutettiin kuten aikaisempi, mutta tutkimus keskittyi lonkka- ja polviproteesitoimenpiteisiin. Tutkimus tilastoi leikkaustuloksia vuosina 2004 - 2009. Tällä kertaa laminaarisen ilmanjaon salit oli jaettu kahteen luokkaan: saleihin, joiden laminaarikaton koko oli vähintään 3,2 m * 3,2 m, ja saleihin, joiden koko oli alle tämän. [23.]

Tutkimuksen tulokset tukivat ensimmäistä tutkimusta. Laminaarikattoa, sen koosta riippumatta, ei voida yhdistää pienempään riskiin saada leikkausalueen infektio tutkituissa toimenpiteissä. [22; 23.]

Vuonna 2012 julkaistussa tutkimuksessa [24] yhdistettiin aiemmin tehdyt tutkimukset liittyen laminaarijärjestelmiin ja sen tehokkuuteen vähentämään leikkausalueen infektioita lonkka- ja polviproteesitoimenpiteissä. Tutkimuksessa kerättiin tulokset aiheesta aiemmin käsitelleistä tutkimuksista viimeisen 10 vuoden ajalta. Koontiin päätyi viisi tutkimusta, jotka olivat peräisin eri maista ja sisälsivät yhteensä yli 75 000 polviproteesileikkausta ja yli 120 000 lonkkaproteesileikkausta. [24.]

Koonti paljasti, ettei yhdessäkään tutkimuksessa havaittu suurta hyötyä laminaarijärjestelmästä polviproteesitoimenpiteissä ja yksi tutkimus jopa osoitti huomattavasti lisääntyntä leikkausalueen infektioriskiä polviproteesitoimenpiteessä.

Lonkkaproteesitoimenpiteissä laminaarijärjestelmästä havaittiin merkittävää hyötyä yhdessä tutkimuksessa ja kolme tutkimusta osoitti huomattavasti lisääntyntä riskiä lonkkaproteesitoimenpiteissä. [24.]

Tutkimusten tulokset tukevat sekoittavan ilmanjaon käyttöä leikkaussalissa. Suuret tutkimukset osoittavat, ettei laminaari-ilmanjaolla saavuteta merkittävää hyötyä infektion kannalta ja jopa lisääntyntä riskiä lonkka- ja polviproteesileikkauksissa. Suurissa tutkimuksissa ei kuitenkaan otettu kantaa salien ilmanvaihtokertoimiin.

5 PUHDASTILAN RAKENTAMINEN

Ilmanvaihtoratkaisun tutkimista varten rakennettiin puhdastila Haltonin Kausalan tehtaassa laboratorion yhteyteen, jossa mittaukset voitiin suorittaa ja tehdä niiden perusteella tarpeelliset muutokset suunnitelmiin ennen sairaalan leikkaussalien rakentamista.

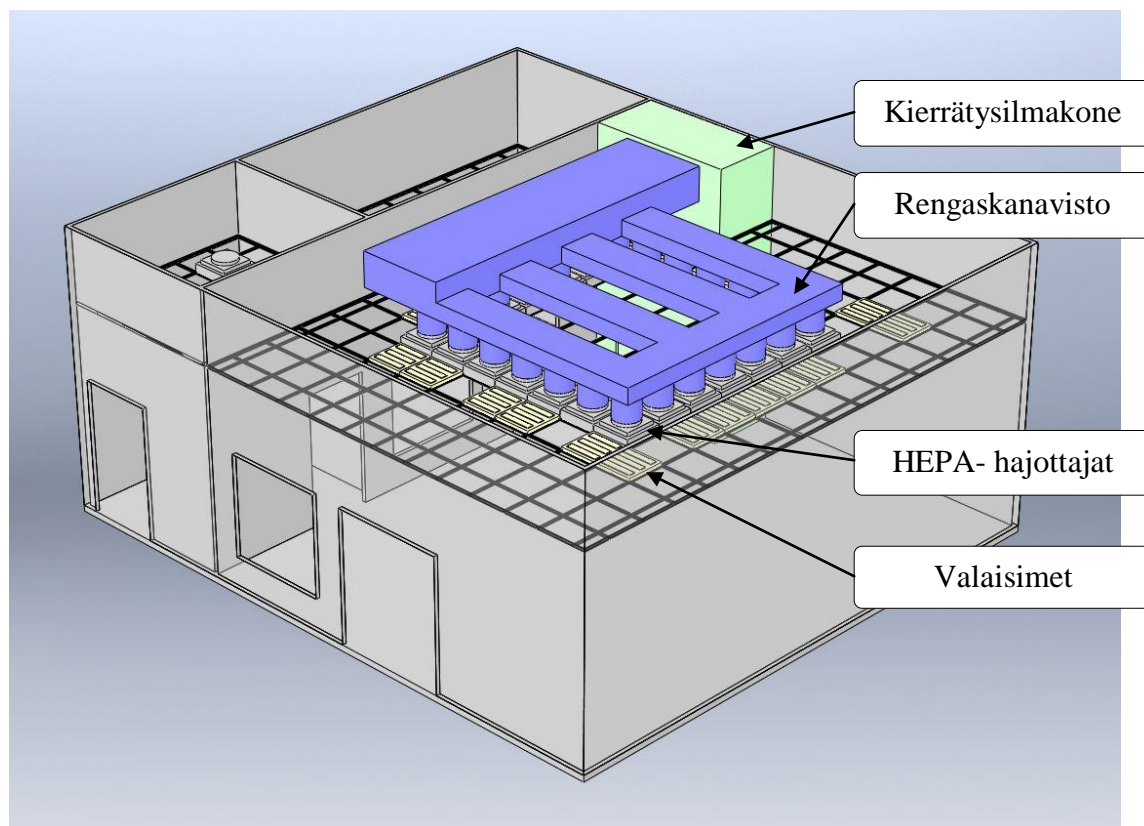
5.1 Tilan ilmanvaihtoratkaisu

Tilan ilmanvaihtoratkaisu oli suunniteltu Ruotsissa. Leikkaussaleja varten Halton kehitti uudentyyppiset HEPA-suodattimilla varustetut suutinhajottajat, ruotsalaisten toiveiden mukaisesti. Halton sopi hankkeen pääurakoitsijan kanssa ratkaisun testaamisesta.

Leikkaussalia palvelee kyseistä sairaalaa varten kehitetty kierrätysilmakone, jonka suunniteltu ilmamäärä oli 2,4 m³/s ja josta noin 20 % on tuloilmaa. Leikkaussalin ilmanvaihtokerroin on n. 46 1/h. Kierrätysilmakone sisältää itsessään nukkasuodattimen, jäähdytyspatterin, kaksi puhallinta ja äänenvaimentimet. Heti kierrätysilmakoneen jälkeen sijoitetaan sähkötoiminen kanavapatteri. Tila pidetään ylipaineisena käytävään nähden.

Kanavisto muodostaa kehän leikkauspöydän ympärille, kehään asennetaan 24 kappaletta HEPA H14 -suodattimellisia suutinhajottajia, asetelma on nähtävissä kuvassa 17. Laitteet tai kanavisto eivät itse sisällä mitään säätöä, mutta HEPA-suodattimen aiheuttama painehäviön on tarkoitus tasata virtaus. Kanavistosta tehtiin virtaussimulointi, joka on esitetty liitteessä 2. Virtaussimulointi osoittaa ilmavirran jakautuvan suhteelli-

sen tasaisesti päätelaitteille. Suurin ero yksittäisessä päätelaitteessa on 13 % tavoiteilmavirrasta, ja suurin ero laitteiden välillä on 22 %.



Kuva 17. Leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisun kanavointi

Neljä poistoilmasäleikköä on sijoitettu kierrätysilmakoneen imuaukon vastaiselle seinälle, joista kaksi on huoneen alareunassa ja kaksi katonrajassa, jolloin mahdolliset kerrostuneet anestesiakaasut saadaan poistettua tilasta. Kierrätysilmakone ottaa kierrätysilmansa koneen alaosassa olevan säleikön kautta. Poisto- ja kierrätysilmasäleiköissä on metalliset nukkasuodattimet.

Esivalmistelutilassa käytetään samoja hajottajia kuin leikkaussalissa. Tilassa on korkea ilmanvaihtokerroin (64 1/h), eikä esivalmistelutilassa käytetä kierrätysilmaa. Tila pidetään ylipaineisena muihin tiloihin nähden. Poisto tapahtuu kahdesta katossa olevasta säleiköstä.

Leikkaussalin ja esivalmisteluhuoneen alakaton yläpuolelle asennettiin poistoilma-venttiilit, joilla luodaan alipaine alakaton sisään. Tällä ratkaisulla estetään kanavien mahdollisten vuotojen aiheuttamien epäpuhtauksien kulkeutuminen huoneeseen.

5.2 Puhdastilan suunnittelu ja rakentaminen

Puhdastila suunniteltiin sairaalan suunnitelmien pohjalta, testitilan pohjapiirustus on esitetty liitteessä 3. Huone mitoitettiin vastaamaan tulevaa leikkaussalia ja ilmanvaihtoratkaisut pyrittiin säilyttämään mahdollisimman muuttumattomana, mutta tilojen erilaisuuden takia kanavointia jouduttiin muokkaamaan. Sairaalassa huoneiden tulo- ja poistoilma johdetaan tilaan keskuskoneelta, kun taas tässä tapauksessa huonetta palvelee itsenäinen ilmanvaihtokone. Ilmanvaihtokone asennettiin puhdastilan viereen rakennetulle tasolle (kuva 18), johon sijoitettiin myös puhdastilan paikalla olleet vanhat kylmäkoneet.



KUVA 18. Puhdastilaa palveleva ilmanvaihtokone

Puhdastilaan varattiin yksi ylimääräinen huone tulevaisuutta ajatellen, tilaan johdettiin kanavat, jotka tulpattiin toistaiseksi. Kanaviin asennettiin myös moottoripellit, ja tarkoituksena on, että ylimääräistä tilaa ei käytetä samaan aikaan kuin leikkaussaliosastoa. Näin ilmavirta saadaan ohjattua joko ylimääräistä huonetta tai leikkaussaliosastoa varten.

Raitisilma ilmanvaihtokoneelle johdetaan pohjoisseinältä vanhan ilmanvaihtokoneen alapuolelle sijoitetusta säleiköstä, ja jäteilmahajottaja päätettiin sijoittaa käytöstä pois-

tetun savunpoistoluukun paikalle. Suodatukseksi valittiin kolmiportainen suodatus, joista kaksi ensimmäistä suodatinta sijaitsee ilmanvaihtokoneessa ja viimeinen pääte-laitteissa. Esisuodattimena on F5-luokan hienosuodatin, pääsuodattimena F9-luokan hienosuodatin ja päätesuodattimena H14-luokan HEPA-suodatin.

Lämmöntalteenottoratkaisuksi valittiin nestekiertoiset glykolipatterit ilmavirtojen se-koituksen välttämiseksi. Tuloilman lämmitys tapahtuu vesikiertoisella lamellipatteril-la.

Ilmanvaihtokoneeseen asennettiin jäähdytys, jolla saadaan ilma esijäähdytettyä kierrä-tysilmakonetta varten ja täten vähentäen kierrätysilmakoneessa tapahtuvaa kondensoi-tumisriskiä. Kostutusta ilmanvaihtokoneeseen ei asennettu, koska sitä ei pidetty suori-tettavien testien kannalta olennaisena.

Puhdastilassa käytettävien materiaaleille asetettiin M1-luokan vaatimus ja rakentami-selle P1-luokan puhtausvaatimus. Puhdastila rakennettiin puhdastilaelementeistä ja alakatto hygienialevyistä. Kanaviston tiiveydelle määritettiin C-luokan tiiveysvaati-mus.

Päätelaitteet asennettiin pääosin kuten ruotsalaisten suunnitelmissa, mutta esivalmiste-lutilan ollessa erikokoinen päätettiin ilmamäärä pitää tilavuuteen nähden samana ja hajottajien määrää vähentää vastaamaan muuttunutta ilmavirtaa. Esivalmistelutilan ovet varustettiin interlock-toiminnolla, joka estää ovien samanaikaisen avaamisen, täten vähentäen epäpuhtauksien kulkeutumista leikkaussaliin.

Puhdastilaa varten rakennettiin uusi valvontakeskus. Valvontakeskuksesta käsin voi-daan ohjata ilmanvaihtokoneen ja kierrätysilmakoneen toimintaa, myös kanavissa olevia moottoripeltejä voidaan ohjata valvontakeskuksen välityksellä. Automatiikka myös pitää tulo- ja huoneilman lämpötilan asetusarvossa.

6 LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHTOON LIITTYVÄT TESTAUKSET

Tavoitteena mittauksilla oli määrittää leikkaussalin puhtausluokka, olosuhteet ja optimoida ratkaisun tehokkuutta. Rakennelma toimii myös mallihuoneena tulevalle sairaalalle. Etukäteen rakennettu mallihuone antaa mahdollisuuden löytää mahdolliset virheet suunnitelmista ja tuotteista ennen varsinaisten leikkaussalien rakentamista. Testaaminen on tärkeää, koska suuri osa leikkaussaleihin tulevista ratkaisuista ja tuotteista ovat kyseistä sairaalaa varten räätälöityjä. Mittalaitteina käytettiin kalibroituja mittareita.

6.1 Puhdastilan ilmanpitävyys

6.1.1 Tavoite

Tiiveyskokeen tarkoituksena oli selvittää tilan vuotoilmamäärä ja verrata tuloksia annettuihin tavoitearvoihin. Tilan tiiveydellä on oleellinen vaikutus painesuhteiden hallintaan. Kokeen aikana ilmenevät tiiveyteen liittyvät rakennusvirheet voitiin myös havaita ja tarvittaessa tiivistää.

6.1.2 Menetelmät

Puhdastilan ilmanpitävyys mitattiin painekoemenetelmällä. Mittaus suoritettiin standardin EN 13829:2000 mukaisesti. Mittauksissa käytettiin standardissa esitettyä B-menetelmää.

Ilmanpitävyydestä suoritettiin syöttämällä ilmaa etuhuoneeseen kalibroidun mittalaipan kautta (Kuva 19). Puhaltimen avulla luotiin tilaan 50 Pa ylipaine. Huoneen paine-ero mitattiin ja pidettiin 5min ajan 50 Pascalissa, jonka jälkeen mittalaipan lävitse kulkeva ilmamäärä kirjattiin. Huonekohtaiset vuodot selvitettiin sulkemalla väliväliä. Paine-ero mittauksiin käytettiin DPM ST650 M mikromanometria, tarkkuus +/- 0,2 Pa ja DPM RS232 mikromanometria, tarkkuus +/- 0,2 Pa

Mittauksesta saatu tulos ilmoitetaan ilmanvuotolukuna. Ilmanvuotoluku kuvaa rakennusvaipan keskimääräistä vuotoilmavirtaa 50 Pa paine-erolla. Rakennusvaipan pinta-alaan lasketaan ulkoseinät aukotuksineen sekä ylä- ja alapohja.

Yleisesti käytössä on kaksi ilmanvuotolukua:

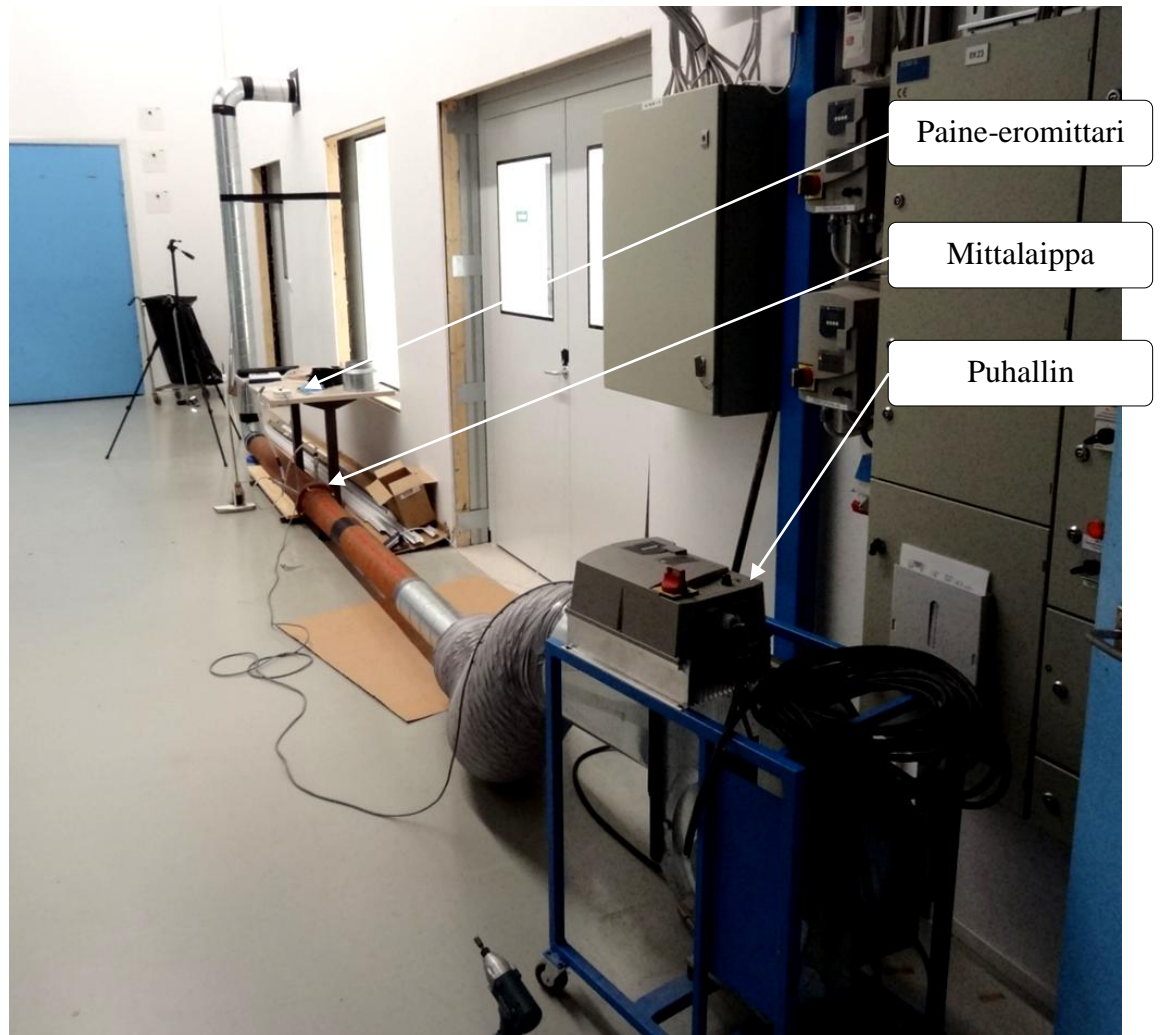
$$q_{50}\text{-luku: } q_{50} = \frac{Q_{50}}{A} \quad [\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}] \quad (4)$$

(vuotavan ilman määrä suhteessa vaipan pinta-alaan)

$$n_{50}\text{-luku: } n_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad [1/\text{h}] \quad (5)$$

(vuotavan ilman määrä suhteessa rakennuksen sisätilavuuteen)

Leikkaussalin ilmanvuotoluvun tavoitearvo oli 0,4 l/sm², joka vastaa q_{50} -lukua 1,44 m³/m²h ja n_{50} -lukua 1,28 1/h.



KUVA 19. Ilmatiiveysmittauksen järjestely

6.1.3 Tulokset

Tiiveyskokeessa mitattiin puhdastilan vuodoksi $0,17 \text{ l/sm}^2$, joka vastaa q_{50} -lukua $0,54 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja n_{50} -lukua $0,61 \text{ l/h}$. Huonekohtaisessa tiiveystarkastelussa leikkaussalin vuoto oli $0,02 \text{ l/sm}^2$ ja etuhuoneen vuoto $0,73 \text{ l/sm}^2$. Tiiveyskokeen mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä 4. Yksittäistä suurta vuotokohtaa ei paikallistettu, joten vuoto kohdistui lähinnä ovirakoihin.

6.1.4 Tulosten tarkastelu

Tiiveyskoe osoitti puhdastilan olevan riittävän tiivis, ja kokonaisvuoto oli vain 45% sallitusta määrästä. Mittaustapa selittää huoneiden väliset suuret vaihtelut. Väliovet ja kanavat vuotivat tilojen välillä, joka näkyi leikkaussalissa vallitsevana ylipaineena (liite 4). Huonekohtaisia tuloksia ei siis voida pitää luotettavina. Kuitenkin kokonaisvuoto on riittävän pieni ja voidaan olettaa, että yksittäinen huone ei aiheuta suurta vuotoa ja kokonaisvuoto suhteutettuna huoneiden pinta-alaan antaa paremman tarkkuuden huoneiden tiiveydestä.

Puhdastila on rakennettu puhdastilaelementeistä, elementtien liitokset ja kaikki läpiviennit ovat tiivistetty huolella. Olikin siis oletettavaa, ettei tilan vuoto ylitä annettuja rajoja. Tiivis rakennelma mahdollistaa ylipainevirtojen ohjauksen ja helpottaa paineerojen säätöä.

6.2 Ilmanvaihtojärjestelmä ja painesuhteet

6.2.1 Tavoite

Ilmanvaihtojärjestelmien, painesuhteiden säädön ja ilmavirtamittausten tarkoituksena on tarkastaa laitteiston toiminta, säätää ilmamäärät ja painesuhteet suunnitelmien mukaisiksi sekä todentaa ne.

6.2.2 Menetelmät

Ilmanvaihtojärjestelmän toiminta tarkastettiin toimintakokeen muodossa. Järjestelmän komponenttien itsenäinen ja yhtenäinen toiminta varmistettiin. Ilmanvaihdon ilma-

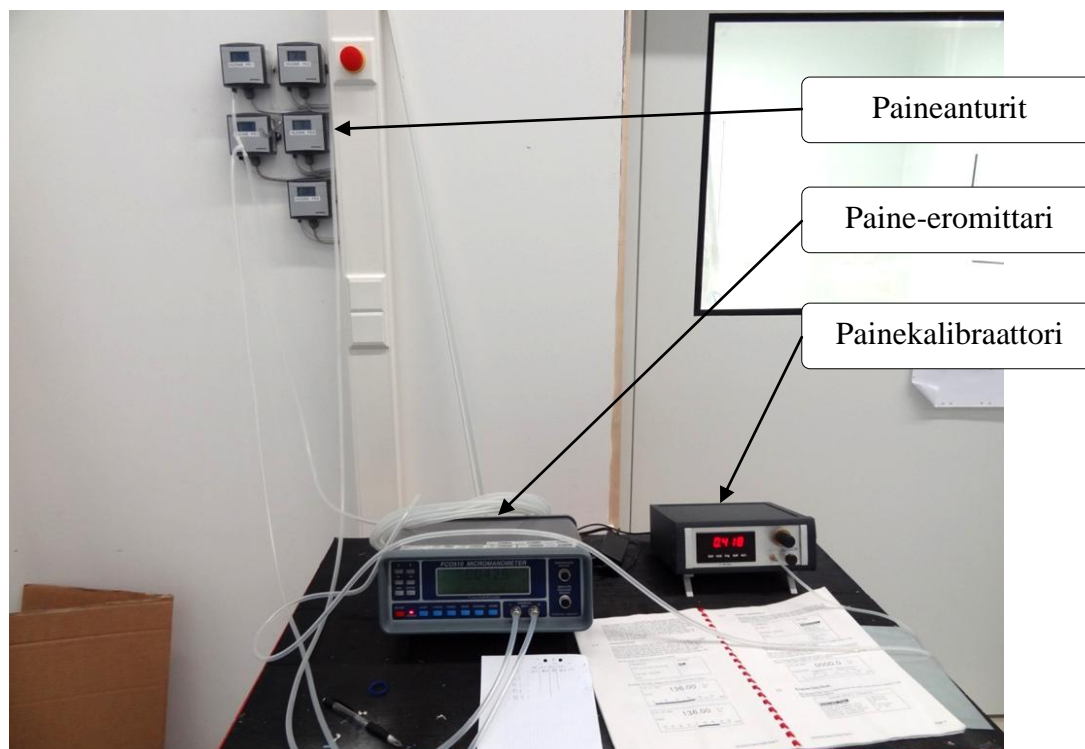
määrät mitattiin ja säädettiin suunnitelmien mukaiseksi. Ilmavirrat mitattiin kanavistosta kuumalanka-anturilla käyttäen 12 pisteen monipistemenetelmää.

Ylipaine saatiin aikaan ilmanvaihdon avulla: tilaan johdettiin enemmän tuloilmaa kuin sieltä poistettiin. Hienosäätö haluttuihin painearvoihin tapahtui paineensäätöventtiileillä. Paine-eroa huoneiden välillä valvottiin jatkuvasti paine-eroantureilla, jotka ovat kytkettyinä valvontajärjestelmään.

Tilaajan asettamat painesuhteet tiloille olivat seuraavat: leikkaussali säädetään 24 Pa ylipaineiseksi käytävään nähden, esivalmistelutila säädetään 30 Pa ylipaineiseksi käytävään nähden ja käytävä 12 Pa ylipaineiseksi tehdastilaan nähden. Tilaajan asettamien arvojen mukaan etuhuone olisi kaikkein ylipaineisin, mutta tilaajan kanssa sovittiin, että etuhuone tehdään alipaineiseksi leikkaussaliin verrattuna, sovittu paine-ero käytävään nähden oli 20 Pa. Käytävään ei saatu tuotettua ylipainetta, joten painesuhteet jäivät leikkaussalista ja etuhuoneesta tulevan ylipaineilman varaan.

Ilmavirtojen ja paine-erojen mittauksessa käytettiin DPM ST650 M -paineeromittaria, tarkkuus $\pm 0,2$ Pa. Sekä kuumalanka-anemometriä TSI 8386-M, tarkkuus nopeusmittauksissa ± 3 %.

Paineantureiden näyttämän virhe tarkastettiin vertaamalla paineantureita tarkkaan mikromanometriin Furnes Controls FCO 510, jonka tarkkuus on $\pm 0,25$ %. Näyttämän virhe mitattiin kolmessa pisteessä (0 Pa, 20 Pa ja 40 Pa). Paineantureiden kalibroinnissa käytettiin painekalibraattoria DM-Sensor DTD+, jolla saadaan tuotettua haluttu paine antureille. Mitta-asetelma on esitetty kuvassa 20.



KUVA 20. Paine-eroantureiden kalibrointi

6.2.3 Tulokset

Toimintakokeissa järjestelmän toiminnassa havaittiin vain puutteita automatiikan hälytysten suhteen ja puutteellisia merkintöjä. Järjestelmässä havaitut puutteet korjattiin seuraavana päivänä.

Kierrätysilmakoneessa oli vakioilmamääräsäätöinen säätöpelti, joka säädettiin annettujen arvojen perusteella 500 l/s. Kuitenkin tarkistusmittauksissa ilmavirta osoittautui $577 \text{ l/s} \pm 6\%$ suuruiseksi. Leikkaussalin poistoilmasäleikköjen ilmavirrat olivat yhteensä $506 \text{ l/s} \pm 6\%$ ja jakautuivat säleiköiden kesken niin, että 1/3 ilmasta poistuu yläkautta ja 2/3 alakautta. Alakatossa olevan poistoilmaventtiilin ilmavirta oli 46 l/s.

Automaatiografiikan ilmoittamat kokonaisvirtaukset poikkesivat alle 2 % kuumalan-ka-anturilla mitatuista ilmamääristä.

Kierrätysilmakoneen ilmavirta säädettiin suodattimien paine-eron mukaan siten, että kanaviston paine vastasi CFD-mallin mukaisia painesuhteita ja suodattimien keskiarvo oli testipenkissä mitatun suodattimen mukainen. Testipenkissä mitatun suodattimen aiheuttama paine-ero oli 62 Pa, kun virtaama on 100 l/s.

Painesuhteet säädettiin siten, että leikkaussalissa oli 24 Pa:n ylipaine ja etuhuoneessa 20 Pa:n ylipaine käytävään verrattuna. Käytävään aiheutuva ylipaine puhdastilasta tulevan ilman johdosta asettui 1-3 Pa:iin. Alakaton painesuhteet huoneisiin nähden asettuivat siten, että leikkaussalin alakatto oli 0,8 Pa alipaineinen ja etuhuoneen alakatto 1,6 Pa alipaineinen.

Paineantureiden virheentarkastuksessa havaittiin, että anturit näyttävät 20 Pa:ssa keskimäärin noin 0,4 Pa liikaa ja 40 Pa:ssa keskimäärin n. 0,9 Pa liikaa. Paineantureiden virheentarkastuksen tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä 5.

6.2.4 Tulosten tarkastelu

Ilmanvaihtojärjestelmän tarkastelussa ilmamäärät saatiin säädettyä lähelle tavoiteltuja arvoja, mutta kierrätysilmakoneen tuloilma jäi suureksi säätöteknisistä syistä. Ilmavirtojen mittauksessa tarvittavat suojaetäisyydet saavutettiin vain kokonaisilmavirtojen mittauksissa, joten tilakohtaisia ilmamääriä ei voida pitää täysin luotettavina. Leikkaussalin poistoilmavirran jakauma oli suunnitelmien mukainen. Paine-eromittauksissa alakaton havaittiin olevan alipaineinen.

Paine-eroantureiden tarkkuus oli n. + 2%, eikä antureiden välillä havaittu suuria eroja. Paine-erojen vaihtelu oli suurempaa kuin paine-eroantureiden näyttämän virhe.

6.3 HEPA-suodattimien ohivuototesti

Päätesuodattimen ohivuototesti suoritetaan, jotta varmistetaan hajottajan tiiveys, suodattimen oikea asennus, suodattimen tiivisteen pitävyys ja itse suodattimen kunto [25, s. 10].

6.3.1 Tavoite

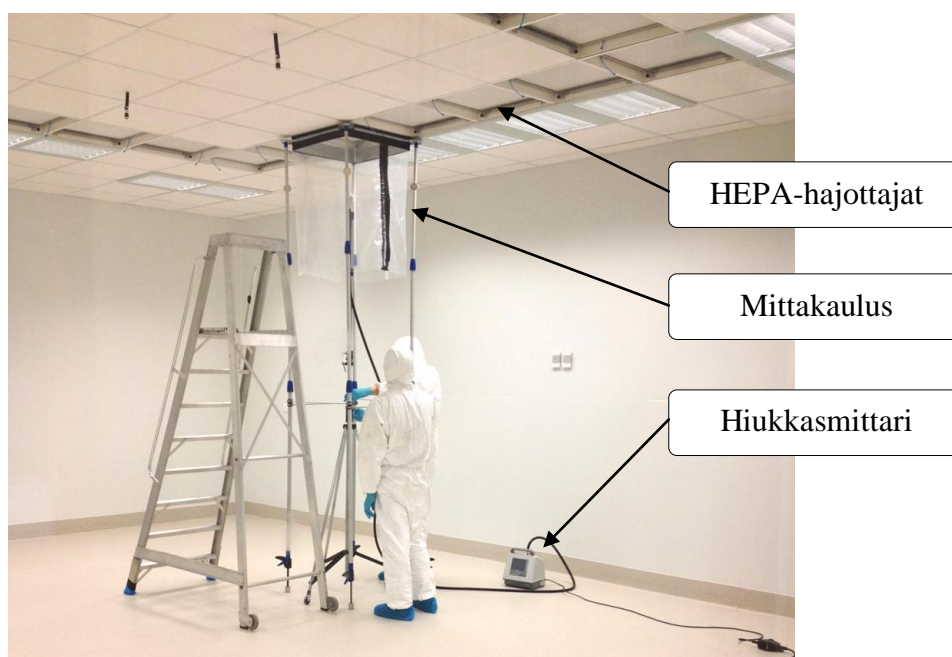
Tavoitteena suodattimen ohivuototestillä oli havaita ja korjata mahdolliset vuodot. Testillä voidaan osoittaa suodattimen ja hajottajan yhteensopivuus sekä keskinäinen tiiveys.

6.3.2 Menetelmät

HEPA-hajottajien testaukseen oli rakennettu erillinen testitila, jossa hajottajat voitiin testata ennen tuotantosarjaa. Puhdastilassa suoritettiin vielä ohivuotomittaukset jokaiselle hajottajille. Mittaukset tehtiin standardin ISO 14644-3:2006 kohdan B.6 mukaan.

Ohivuototestissä kanavaan syötettiin hiukkasgeneraattorilla hiukkasia, joiden pitoisuus mitattiin hiukkaslaskurilla ennen suodatinta ja suodattimen jälkeen, näin saatiin suodattimen läpäisyaste. Mahdolliset suodattimen vuotokohdat esiintyvät pitoisuuksien piikkeinä. Hyväksyttävä hiukkasmäärä suodattimen vuodolle saatiin laskettua ISO 14644-3:2006 -standardin mukaan, kun tiedettiin kanaviston hiukkaspitoisuus. Hiukkaspitoisuudet mitattiin kanavistosta ennen mittausten aloittamista ja muutaman kerran mittausten välissä. Mittauksissa käytettiin keskimääräisesti 104 l/s ilmamäärää hajottajaa kohden.

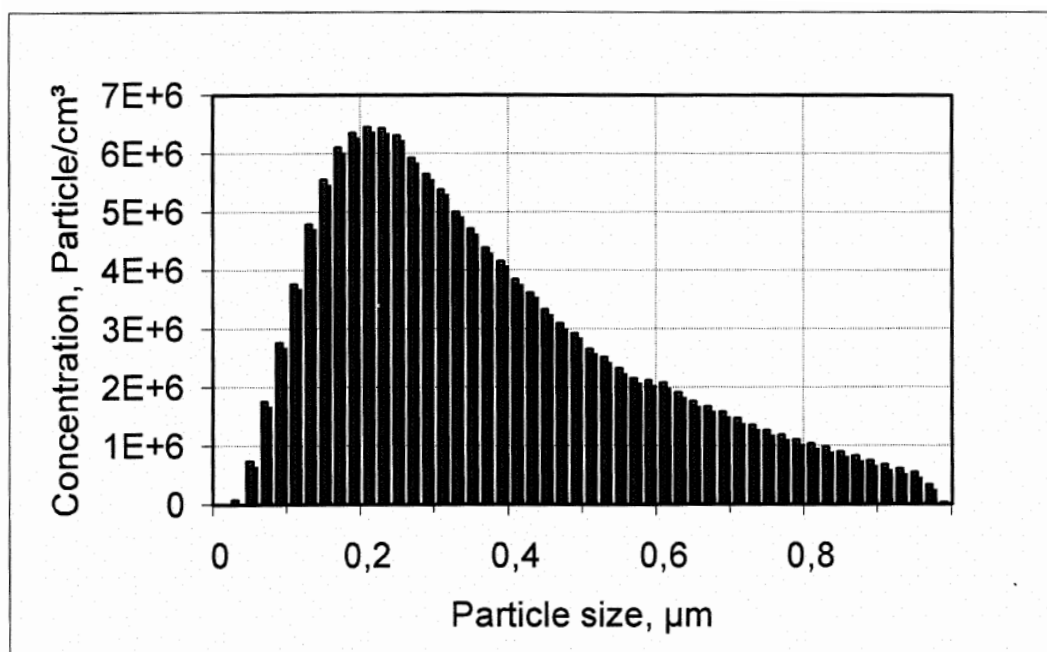
Mittauksen ajaksi hajottajiin tavallisesti teipataan muoviset helmat, jolla estetään huoneilman sekoittuminen suodattimelta tulevaan ilmaan. Teippaaminen on kuitenkin työlästä ja aiheuttaa hajottajan kontaminaatiota. Täten valmistimme hajottajaan mitta-kaulus, jotta mittauksissa kaulus voitiin siirtää hajottajasta toiseen ilman suurta vaivaa ja hajottajien kontaminaatoriskiä.



KUVA 21. HEPA-suodattimien ohivuodon testaus

Suodattimet tarkastettiin siten, että mittapäätä liikutettiin hitaasti suodattimen alapuolella ja koko suodattimen ala tarkistettiin sekä hajottajan ja suodattimen väliin jäävä reuna. Kulmat sekä paine-ero mittanipan kohdalla vuoto tarkastettiin yhden mittajakson pituisella, paikoillaan olevalla mittauksella.

Hiukkasgeneraattorina käytetty laite oli TOPAS ATM 226 ja hiukkasaineena DEHS (Di Ethyl Hexyl Sebacate), jonka hiukkasjakauma on esitetty kuvassa 22.



KUVA 22. DEHS hiukkasaineen hiukkasjakauma

Hiukkaslaskurina käytetty laite oli Particle Measuring System LASAIR II 350L. Laskurissa pumppu imee ilmaa vakioilmavirralla 50 litraa minuutissa. Ilma kulkeutuu näytteenottokammioon, jossa ohikulkevat partikkelit mitataan lasersäteen avulla. Partikkelit aiheuttavat lasersäteen valonsirontaa, jonka keräysoptiikka havaitsee ja muuntaa jännitetiedoksi, hiukkaskoko määritetään jännitteen amplitudin perusteella. Hiukaset jaotellaan koon mukaan ja laite näyttää hiukkasten differentiaalisen ja kumulatiivisen arvon. Laskennan jälkeen ilma kulkeutuu pumpun kautta HEPA-suodattimelle, jonka jälkeen näyteilma poistuu laitteesta.

6.3.3 Tulokset

Kanavistoon syötettiin hiukkasia heti ilmanvaihtokoneen jälkeen ja hiukkaspitoisuus mitattiin yhdyskanavistosta. Keskimääräinen hiukkaspitoisuus kanavistossa mittausten aikana oli noin 9,5 miljoonaa hiukkasta per kuutio. Suodattimien skannauksessa sallituksi hiukkasrajaksi valittiin 4 hiukkasta, jonka avulla voitiin laskea skannausnopeus standardin ISO 14644-3:2006 kohdan B6.3.6.4 mukaan, skannausnopeudeksi saatiin 1,63 cm/s. Mitta-aika saadaan jakamalla mittakartion halkaisija (5cm) skannausnopeudella, saatu mitta-aika on 3s. Mittarin minimimitta-aika on kuitenkin 6 s, joten mitta-aikana käytettiin 6 sekuntia.

Mittariin asetettiin hälytysrajaksi 5 hiukkasta 6 sekunnin mitta-ajalla. Jos hiukkasmittari hälytti, tehtiin hälytyksen aiheuttamassa kohdassa tarkistusmittaus. Tarkistusmittauksen mitta-aikana käytettiin 6 sekuntia, ja sallittu hiukkasmäärä kyseiselle mitta-ajalle oli keskimäärin 14 hiukkasta. Hälytyksiä tuli vain silloin, jos mittakartio kolahti hajottajan kylkeen ja viimeisissä hajottajissa, joissa mitta-kauluksen tiiviste alkoi vuotaa. Kauluksen kiristys poisti havaitut hiukkaset, eikä tarkistusmittauksissa havaittu vuotoja.

Etuhuoneessa kanavapitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia n. 20 miljoonaa hiukkasta per kuutio, mutta mittauksissa käytettiin leikkaussalille asetettuja raja-arvoja. Suodattimet läpäisivät testin jopa tiukemmilla raja-arvoilla, eikä vuotoja havaittu.

Ohivuototestin tuloksina yhdestäkään suodattimesta ei havaittu ohivuotoja ja kaikissa suodattimissa läpäisyaste oli suodatusluokan mukainen (0,005 %). Hiukkasmäärät kuuden sekunnin mittauksissa olivat pääsääntöisesti nollan ja kahden hiukkasen välillä.

6.3.4 Tulosten tarkastelu

Suodattimien ohivuototestin tulokset osoittivat, että suodattimet ja hajottajat olivat tiiviitä, eikä tilaan pääse hiukkasia tilan ollessa ylipaineinen ympäröivään tilaan nähden ja alakaton alipaineinen huoneeseen nähden. Mittakaulus osoittautui loistavaksi apuvälineeksi ja lyhensi mittauksiin tarvittavaa aikaa huomattavasti.

6.4 Äänenpainetasot

6.4.1 Tavoite

Tavoitteena äänenpainetasomittauksissa oli selvittää leikkaussalissa ilmanvaihdesta aiheutuvat äänitasot. Ilmanvaihdon aiheuttaman äänenpainetason tavoitearvo oli standardin SIS-TS 39:2012 mukaan alle 45dB(A).

6.4.2 Menetelmät

Mittaus suoritettiin tehtaan toiminta-aikojen ulkopuolella. Mittauksissa käytettiin standardien mukaista äänitasomittaria, 01dB SIP95, jossa on A-taajuuspainotus, äänimittarin alarajana on 20 dB. Äänitasomittarista luettiin näyttämän keskimääräinen äänenpainetaso (L_p) jokaiselle oktaavikaistalle. Mittauksissa käytetty huoneen vaimennus oli 0 dB.

Mittaukset suoritettiin viidellä asetelmalla:

1. Kaikki laitteet ovat suljettuina
2. Ilmanvaihtokone ja apulaitteet ovat käynnissä
3. IV-kone ja kierrätysilmakone ovat käynnissä (2400 l/s)
4. IV-kone ja kierrätysilmakone ovat käynnissä (2200 l/s)
5. IV-kone ja kierrätysilmakone ovat käynnissä (2000 l/s)

Äänenpainetaso mitattiin pisteissä 1 ja 9 leikkaustason korkeudelta (1,1m), mittapistet on esitetty liitteessä 6.

6.4.3 Tulokset

Äänenpainemittausten tulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Äänenpainemittauksen tulokset

Ase- telma	Mitta- piste	qv (l/s)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	L _w	Huone L _p (A)	Kierroilma L _p (A)
1	1	0	42	33	22	20	-	-	-	-	33,8	22,1	-
2	1	577	47	40	41	33	29	21	-	-	44,1	36,0	-
	9	577	46	43	41	32	32	25	-	-	45,6	37,1	-
3	1	2400	55	58	45	37	33	28	21	-	58,3	44,1	43,4
	9	2400	58	63	45	38	35	32	25	-	63,1	48,0	47,7
4	1	2200	55	58	44	36	30	25	-	-	58,2	43,6	42,8
	9	2200	58	64	44	35	32	28	21	-	64,1	48,5	48,2
5	1	2000	55	54	44	36	29	24	-	-	54,5	41,3	39,7
	9	2000	58	59	42	36	31	26	-	-	59,1	44,3	43,4

Tuloksista havaitaan, että ilmanvaihdon aiheuttamat äänitasot painottuvat matalille taajuuksille. Kierrätysilmakoneen havaittiin aiheuttavan eniten ääntä 125Hz taajuudella. Tämä näkyy Kierrätysilmakonetta lähempänä olevan mittapisteen 9 suurena lukemana. Neljännen asetelman pisteen 9 mittauksen 125 Hz tulos nostaa äänitason korkeammaksi kuin kolmannen asetelman vastaavan pisteen dB(A) lukema.

6.4.4 Tulosten tarkastelu

Suunnitellulla ilmavirralla ei tavoitearvoa saavutettu. Pienennetyllä ilmamäärällä (2000 l/s) tavoitearvoon ylettiin. Äänitasojen painottuminen matalille taajuuksille kertoo siitä, että puhaltimet ovat suurin äänen aiheuttaja. Mittauksissa käytettiin 0 dB huonevaimennusta, tämän vaikutus näkyy tuloksissa suurempina arvoina, ja jo 3 dB vaimennuksella suunniteltu ilmavirta täyttäisi 45 dB(A) tavoitearvon. Todellisessa leikkaussalissa on huonevaimennus noin 3 - 4 dB.

6.5 Puhtausluokan määrittäminen

6.5.1 Tavoite

Tavoitteena ilmanvaihtoratkaisulla oli yltää tilaajan asettamaan arvoon 5 cfu/m³. Mikrobiologinen pitoisuus ei itsessään käy suunnittelukriteeristä, mutta tutkimukset osoittavat, että korkeintaan 5 % yli 5µm hiukkasista on pesäkkeen muodostavia yksilöitä. [7.] Täten tilan puhtausluokan tavoitteeksi saatiin ISO 5 -luokan leikkaussali.

Huoneen tavoitteena oli saavuttaa ISO 5 -luokan puhtaustaso lepotilassa, lepotilalla tarkoitetaan standardissa EN 14464-1:2000 määritettyä tilaa, missä asennus on suori-

tettu valmiiksi, laitteet asennettuina ja toiminnassa asiakkaan ja toimittajan sopimalla tavalla, mutta ilman läsnä olevaa henkilökuntaa.

6.5.2 Menetelmät

Mittaukset suoritettiin ISO14644-1:2000 standardin mukaan. Vähimmäisnäytteenotto-kohtien määrä saatiin standardin kohdan B 4.1 mukaan laskemalla tarkasteltavan tilan pinta-alan neliöjuuri. Tässä tapauksessa vähimmäisnäytteenotto-kohtien määrä oli kahdeksan. Leikkaussalissa käytettiin yhdeksää mittapistettä. Mittapistet jaettiin leikkausalueelle metrin etäisyydelle toisistaan leikkaustason korkeudelle (1,1m), näin huomio keskittyi leikkauspöydän läheisyyteen. Mittapistet ovat nähtävissä liitteessä 6. Mittauksissa käytetty hiukkaslaskuri oli Particle Measuring System LASAIR II 350L.

Yksittäisen mittauspisteen näytetilavuuden määrittäminen tapahtui ISO 14644-1:2000 kohdan B 4.2. mukaan. Jokaisesta näytteenottokohdasta otetaan riittävä ilmamäärä, jotta vähintään 20 hiukkasta tarkasteltavaa hiukkaskokoa on mahdollista havaita. ISO 5 -luokassa tarkasteltava hiukkaskoko on 5 μm , jonka pitoisuusraja on 29 hiukkasta kuutiossa. Yksittäiseksi näytetilavuudeksi tulee täten 690 litraa. Käytössä olevan hiukkaslaskurin imuteho on 50 l/min eli tämä vastaa n. 14 min. mittausaikaa. Näytteenottoaika on suhteellisen pitkä, ja tätä olisi voitu lyhentää käyttämällä sekventiaalista näytteenottomenetelmää, joka on esitetty ISO 14644-1:2000 -standardin liitteessä F. Hiukkasten pitoisuus kirjattiin ja laskettiin keskiarvo, keskihajonta sekä 95 % luotamusvälin yläraja.

Olosuhteet mittauksen aikana pidettiin muuttumattomina, huone pidettiin vakioilämpötilassa 21 °C, jolloin tuloilma on noin 19,7 °C. Ilmanvaihtokoneelta tuleva ilma pidettiin 17 °C lämpöisenä. Leikkaussali pidettiin n. 24 Pa ylipaineisena käytävään nähden ja etuhuone n. 20 Pa ylipaineisena käytävään nähden. Kierrätysilmakoneen ilmamäärä oli n. 2400 l/s, tulo ja poistoilma leikkaussaliin pidettiin ennallaan (+577 l/s \pm 6% ja -552 l/s \pm 6%).

6.5.3 Tulokset

Hiukkasmittausten tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. ISO-mittausten tulokset lepotilassa, n/m³ kokoluokittain

<i>Location</i>	<i>0,3 μm</i>	<i>0,5 μm</i>	<i>1 μm</i>	<i>5 μm</i>	<i>10 μm</i>	<i>25 μm</i>
1	13	1	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0
3	7	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	9	1	0	0	0	0
6	6	1	0	0	0	0
7	10	0	0	0	0	0
8	10	3	0	0	0	0
9	32	3	0	0	0	0
Mean	10	1	0	0	0	0
95 % U.C.L	16	2	0	0	0	0
S.D.	9	1	0	0	0	0

95 % luottamusvälin ylärajan mukaan leikkaussali yltää lepotilassa ISO 3 puhtausluokkaan rajojen ollessa > 0,3 μm hiukkasille 102 n/m³, > 0,5 μm hiukkasille 35 n/m³ ja > 1 μm hiukkasille 8 n/m³.

Tarkastimme myös likaisimmaksi oletetun nurkan (piste 10, liite 6) ja puolen metrin etäisyyden kierrätysilmasäleikön keskeltä (piste 11, liite 6), joka oletettavasti kuvaa huoneen keskimääräistä hiukkaspitoisuutta. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Leikkaussali lepotilassa, ylimääräiset pisteet, n/m³ kokoluokittain

<i>location</i>	<i>0,3 μm</i>	<i>0,5 μm</i>	<i>1 μm</i>	<i>5 μm</i>	<i>10 μm</i>	<i>25 μm</i>
10	22	4	0	0	0	0
11	30	3	0	0	0	0

6.5.4 Tulosten tarkastelu

Leikkausalue saavutti mittauksissa puhtausluokan ISO 3, tätä voidaan pitää hyvänä tuloksena ja tulos on huomattavasti parempi kuin tavoiteltu ISO 5 -luokka. Leikkaussalin pitoisuudet jäivät vain muutamalla hiukkasella ISO 2 -luokasta ja luokka olisi luultavasti saavutettu, jos mittapistettä olisi pystytty vaihtamaan ulkoa käsin. Mittapisteen vaihdossa mittapistettä siirrettiin käsin paikasta toiseen, ja mittasalkoa vaihdettiin keskimmäiseen mittapisteseen. Tämä henkilön läsnäolo ja ovien avaus toi hiukkasia tilaan, vaikutusta pyrittiin kuitenkin vähentämään 10 minuutin puhdistusjaksolla ennen jokaista mittausta.

Ylimääräisissä pisteissä mitatut tulokset osoittavat, ettei huoneessa ole suuria hiukkaspitoisuuksia ja hiukkaspitoisuudet myös nurkissa ovat alhaiset. Tuloksista nähdään, että leikkausalueella ilma on hieman puhtaampaa kuin muualla tilassa.

Salin korkea puhtaustaso kertoo ilmassa olevien hiukkasten vähäisyydestä, joka taas korreloi mikrobien määrää. Ilmanvaihtoratkaisu tarjoaa puhtauden suhteen hyvät leikkausolosuhteet ja auttaa vähentämään leikkausinfektioiden syntyä.

6.6 Palautumisaika

Palautumisajalla tarkoitetaan aikaa, jossa pitoisuus laskee sadasosaan lähtötilanteen pitoisuudesta [25, s. 48]. Palautumisaika kuvastaa ilmanvaihtoratkaisun kykyä laimentaa syntyvät epäpuhtaudet, ja se perustuu ilmanvaihtokertoimeen ja tuloilman sekoitusasteeseen.

6.6.1 Tavoite

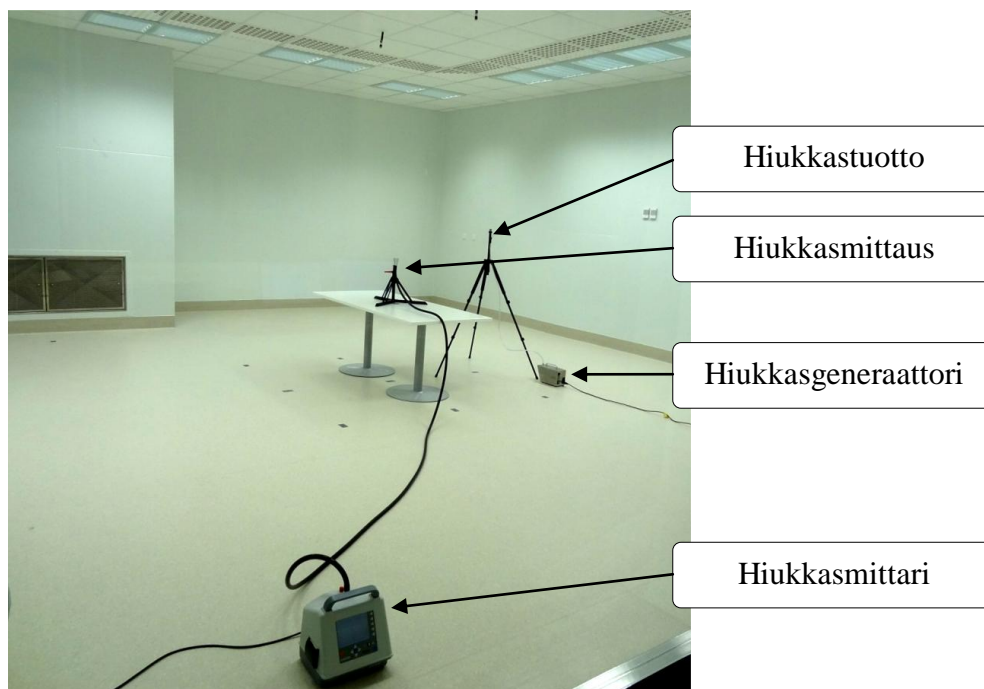
Tavoitteena palautumisajan testillä oli selvittää huoneen palautumisaika. Palautumisajan tavoitearvo oli standardin SIS-TS 39:2012 mukaisesti alle 20 minuuttia.

6.6.2 Menetelmät

Testi suoritettiin huoneen ollessa lepotilassa. Testaus suoritettiin standardin ISO 14644-3:2006 kohdan B12 mukaisesti: Huonetta täytetään hiukkasilla, kunnes saavutetaan vähintään satakertainen pitoisuus tavoitepitoisuuteen nähden. Tavoitepitoisuutena käytetään tarkasteltavan hiukkaskoon luokkapitoisuusrajaa. Kun haluttu pitoisuus saavutetaan, hiukkastentuotto pysäytetään ja ajanotto käynnistetään. Mittauksessa tarkasteltiin 0,5µm hiukkaspitoisuuksia. Hiukkaspitoisuuksia seurattiin läpi testin jatkuvalla hiukkasmittauksella, 30 sekunnin mitta-jaksoja käyttäen. Hiukkaslaskurina oli Particle Measuring System LASAIR II 350L.

Testi toistettiin kolme kertaa siten, että yhdellä kerralla hiukkasia syötettiin leikkauspöydän sivulta (piste 4, liite 6) ilmaan 1,5 m korkeudelta ja hiukkaspitoisuuksia mitataan leikkauspöydän keskeltä (piste 5, liite 6) 1,1 m korkeudelta. Toisella kerralla tilanne oli muuten sama, mutta hiukkassyöttö vaihdettiin pöydän toiselle puolelle (piste

6, liite 6), näin voitiin tutkia ilmanjaon symmetrisyyttä. Kolmannella kerralla hiuk-
kasia mitattiin kierrätysilmasäleikön edestä (liite 5, piste 11) 0,5 m korkeudelta ja
hiukkassyöttö asetettiin leikkauspöydän sivulle (piste 4, liite 6).

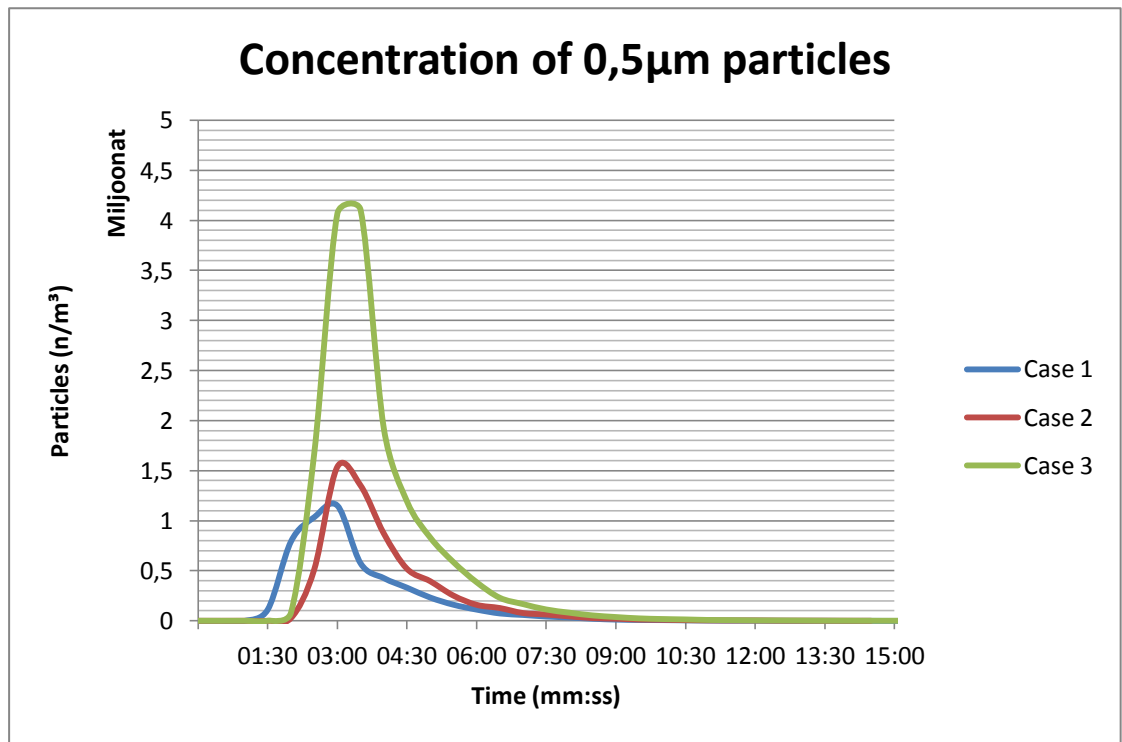


KUVA 23. Palautumisajan mittaus, ensimmäinen mittaus

Olosuhteet mittausten aikana pidettiin muuttumattomina, huone pidettiin vakio-
lämpötilassa 21 °C, jolloin puhallusilma on noin 19,7 °C. Ilmanvaihtokoneelta tuleva ilma
pidettiin 17 °C lämpöisenä. Leikkaussali pidettiin n. 24 Pa ylipaineisena käytävään
nähdessä ja etuhuone n. 20 Pa ylipaineisena käytävään nähdessä. Kierrätysilmakoneen
ilmamäärä oli n. 2400 l/s, tulo ja poistoilma leikkaussaliin pidettiin ennallaan (+577 l/s
 $\pm 6\%$ ja -552 l/s $\pm 6\%$).

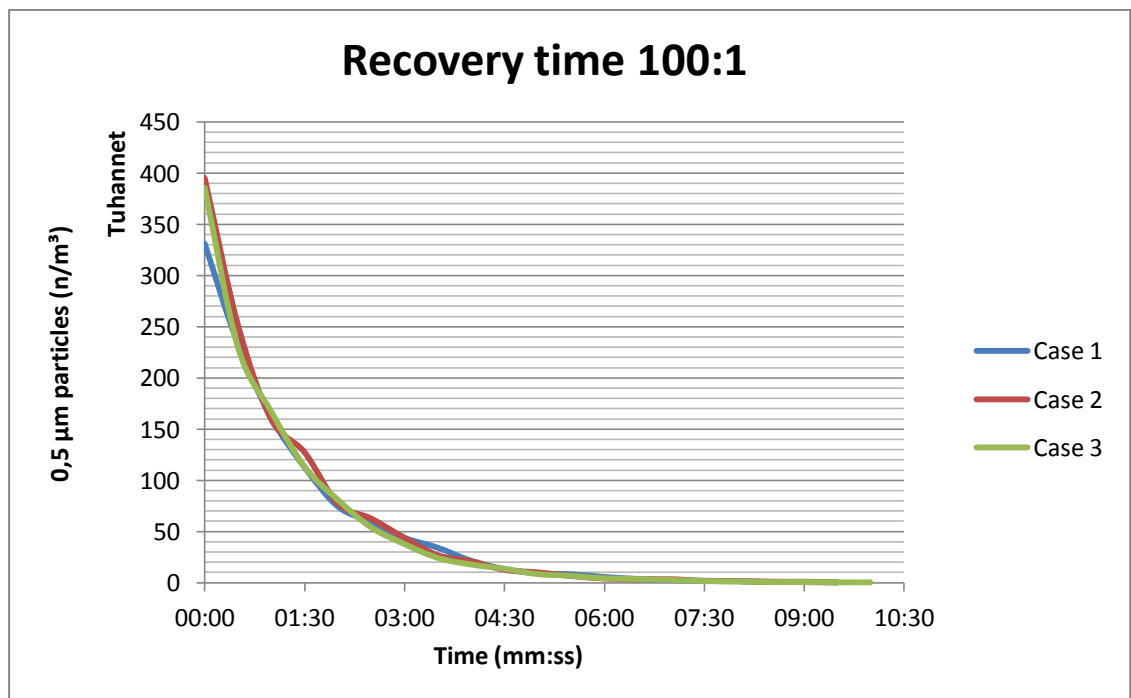
6.6.3 Tulokset

Hiukkaskasgeneraattorilla hiukkaspitoisuudet nousivat nopeasti, hiukkaskasmittaus pysäytet-
tiin kun pitoisuus ylitti miljoona hiukkasta per kuutio (0,5 μm). Hiukkaspitoisuus nou-
si vielä jonkin aikaa tuoton pysähtyttyä, ilman sekoittumisen sekä mittarin ja gene-
raattorin etäisyydestä aiheutuvan viiveen vuoksi. Palautumisajan testauksessa ilman
hiukkaspitoisuus laski sadasosaan keskimäärin noin kuudessa minuutissa ja 34 sekun-
nissa. Hiukkaspitoisuuksien vaihtelut on nähtävissä kuvaajassa 1.



KUVAAJA 1. Hiukkaspitoisuudet leikkaussalissa palautumisajan testeissä

Ajallisesti sovitettu pitoisuuksien alenema on nähtävissä kuvaajassa 2. Liitteessä 7 on esitetty aleneman sovitetut käyrät ja aleneman laskenta.



KUVAAJA 2. Hiukkaspitoisuuksien alenema palautumisajan testissä

Palautumisajan perusteella voidaan laskea ilmanvaihtokerroin kaavalla 6.

$$C(t) = C_0 e^{-nt} \quad (6)$$

Missä:

$C(t)$ on pitoisuus ajan hetkellä t (n/m^3)

C_0 on alkupitoisuus (n/m^3)

t on aika (h)

n on ilmanvaihtokerroin ($1/\text{h}$)

Ilmanvaihtokertoimen lasketuksi arvoksi saadaan ensimmäisessä tilanteessa 40,6 vaihtoa tunnissa, toisessa tilanteessa 41,6 vaihtoa tunnissa ja kolmannessa 43,6 vaihtoa tunnissa. Ilmanvaihtokertoimesta voidaan laskea myös laskennallinen ilmamäärä kaavalla 7.

$$n = \frac{Q}{V} \quad (7)$$

Missä:

n on ilmanvaihtokerroin ($1/\text{h}$)

Q on ilmamäärä (m^3/h)

V on huoneen tilavuus (m^3)

Laskennalliseksi ilmamääräksi saadaan ensimmäisessä tapauksessa 2101 l/s ja toisessa tapauksessa 2152 l/s ja kolmannessa 2256 l/s, jotka ovat lähellä asetettua ilmamäärää 2400 l/s. Koska laskennallinen ilmamäärä olettaa, että ilma on täysin sekoittunutta, voidaan päätellä, että n. 200 l/s tuloilmasta kulkeutuu oikosulkuvirtauksena suoraan poistoilmalaitteisiin.

6.6.4 Tulosten tarkastelu

Ilmanvaihtoratkaisulla saavutettiin tilaajan asettama tavoite ja palautumisajan perusteella ilmamäärää voitaisiin laskea. Kahden ensimmäisen mittauksen tulokset olivat lähes identtisiä ja tämä kertoo ilmanvaihdon symmetrisyydestä. Kolmannessa tapauksessa, jossa mittalaite oli asetettu kierrätysilma-aukon eteen palautumisajaksi saatiin yllättäen hieman lyhempi aika. Tämä ero voi johtua mittaepätarkkuuksista tai siitä, että hiukkasmittaus oli eri korkeudella ja etäisyydellä hiukkastuotosta. Ilman lähes täydellisestä sekoittumisesta kertoo se, että kaikissa mittapisteissä saavutettiin lähes sama laskennallinen palautumisaika.

Alhainen palautumisaika kertoo ilman hyvästä sekoitusasteesta ja korkean ilmanvaih- tokertoimen hyödystä. Se myös kuvaa ilmanvaihdon kykyä poistaa ja laimentaa leik- kauksen aikana syntyviä päästöjä ja mahdollistaa hyvät olosuhteet uudelle leikkauk- selle, kun leikkausten välisessä siivouksessa syntyvät hiukkaspäästöt laimenevat no- peasti.

6.7 Huoneen termiset olosuhteet

6.7.1 Tavoite

Leikkaussalista mitattiin ilman ominaisuuksia, jotta voitaisiin selvittää tilassa vallitse- vat olosuhteet. Tärkeimpinä suureina olivat nopeus ja lämpötilaerot. Tilaaja ei asetta- nut tavoitearvoja ilmannopeudelle, lämpötiloille eikä kosteudelle, mutta yleisesti leik- kaussaleissa käytetyt arvot ovat ilmannopeuksille $0,45 \pm 0,1$ m/s, lämpötiloille 22 ± 3 °C ja kosteudelle $35 - 45 \% \pm 10 \%$. Mittauksissa lämpötilan asetusarvoksi sovittiin 21 °C.

6.7.2 Menetelmät

Ilman ominaisuuksista ilman nopeutta, lämpötilaa ja kosteutta mitattiin useasta pis- teestä. Mittapisteinä käytetään samaa yhdeksän pisteen ruudukkoa, jota käytettiin puh- tausluokan määrittelyssä, lisäksi ominaisuudet mitataan liitteen 6 pisteistä 10 ja 12. Mittaukset tehtiin langattomalla mittausjärjestelmällä, Sensor Electronic ThermCond- Sys 5500, jossa on neljä mittamoduulia. Moduulit asetettiin korkeuksille 1,8 m; 1,1 m; 0,5 m ja 0,1 m. Moduulit mittaavat ilman nopeutta, painetta, kosteutta ja lämpötilaa kuivana, märkänä sekä operatiivisena.

Ensimmäisenä mitattiin ilman ominaisuudet ilmavirran ollessa 2400 l/s. Mittaustulos- ten perusteella hajottajien suuttimia hienosäädettiin ja sama mittaus suoritettiin uudes- taan. Langattoman mittasalon 0,1m korkeudella olevan moduulin lämpötilasensorit olivat rikki ja joistakin moduuleista kalibrointi oli vanhentunut, tästä syystä ilmavirtaa mitattiin myös langallisella mittausjärjestelmällä, Sensor Electronic HT400. Langalli- sessa mittajärjestelmässä oli kuusi anturia. Anturit asetettiin korkeuksille 1,8 m; 1,5 m; 1,1 m; 0,7 m; 0,5 m ja 0,1 m. Anturit mittaavat ilman nopeutta ja lämpötilaa. Lan- gallisella mittasalolla mitattiin yhdeksän pisteen ruudukko 2200 l/s ilmavirralla.

Mittausten ajaksi tila säädettiin valvontakeskuksesta pitämään vakiolämpötilaa 21 °C, jolloin puhallusilma on noin 19,7 °C. Mitta-aikana käytettiin 3 minuutin keskiarvoa mittapistettä kohden. Mittausten aikana leikkaussalin keskellä oli pöytä, jonka mitat olivat 800x1800x730 mm (LxPxK).

6.7.3 Tulokset

Mittausten tulosteella leikkaussalissa ei ole suurta lämpökerrostumaa, ilman lämpötilat eri korkeuksilla ovat lähellä toisistaan. Mittapisteiden välillä ei havaittu suuria lämpötilaeroja, huoneen keskellä (pisteet 1-9) lämpötilat olivat noin 20 °C ja huoneen kulmissa (pisteet 10 ja 12) noin 20,2 °C. Lämpötilat on nähtävissä taulukossa 5. Ilmankosteus mittauksissa oli n. 36 %.

TAULUKKO 5. Ilman lämpötilat eri korkeuksilla

	<i>point</i> <i>1</i>	<i>point</i> <i>2</i>	<i>point</i> <i>3</i>	<i>point</i> <i>4</i>	<i>point</i> <i>5</i>	<i>point</i> <i>6</i>	<i>point</i> <i>7</i>	<i>point</i> <i>8</i>	<i>point</i> <i>9</i>	<i>point</i> <i>10</i>	<i>point</i> <i>12</i>
Height [mm]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{mean} [°C]
1800	20,0	19,7	20,2	19,8	19,6	19,7	20,0	20,0	20,1	20,2	20,2
1500	20,1	19,8	20,2	20,0	19,9	19,9	20,2	20,0	20,2	20,2	20,2
1100	20,1	19,8	20,2	20,0	19,8	19,9	20,1	19,9	20,1	20,2	20,2
700	20,1	20,0	20,2	20,2	20,1	20,1	20,2	20,1	20,3	20,5	20,4
500	20,0	20,1	19,9	19,9	20,0	19,9	19,9	20,0	20,0	20,2	20,1
100	20,0	19,9	19,9	19,9	20,0	19,8	20,0	20,0	19,8	20,2	20,0

Ilmannopeusmittausten perusteella havaittiin, että ilmasuihku kaartuu alavasemmalle Kierrätysilmakoneesta päin katsottuna (liite 8, sivu 1) Tämän todettiin johtuvan siitä, että oikeanpuoleisen hajotinlinjan (hajottajat 2-6, liite 6) ilmamäärä on 7,5 % suurempi vastakkaiseen puoleen verrattuna ja yläpuoleisen hajotinlinjan (hajottajat 14-18, liite 6) 7,2% suurempi vastakkaiseen puoleen verrattuna. Ilmanjako tasapainotettiin suuttimia säätämällä. Uusintamittauksissa ilmasuihkun havaittiin olevan lähes symmetrinen 2400 l/s ja 2200 l/s virtaamilla (liite 8, sivut 2 ja 3).

Ilman nopeudet ylittivät leikkaussaleissa yleisesti käytetyt tavoitearvot, keskiarvo yhdeksän pisteen kesken molemmille ilmavirroille oli 0,49 m/s, ja suurin yksittäinen arvo oli 2400 l/s ilmavirralla 0,98 m/s ja 2200 l/s ilmavirralla 0,89 m/s.

6.7.4 Tulosten tarkastelu

Tuloksissa ilmasuihkun havaittiin olevan epäsymmetrinen, ja tämä korjattiin suuttimia säätämällä. Ilman lämpötilojen todettiin olevan huoneen keskellä hieman alhaisempia kuin huoneen reunoilla johtuen pääosin keskialueelle puhallettavasta alilämpöisestä tuloilmasta.

Mittaukset suoritettiin kalustamattomassa leikkaussalissa, jolloin mittauksissa ei tutkittu normaalisti leikkaussalissa olevien laitteiden aikaansaamaa lämpökuormaa, eikä valaisimien ja muiden apulaitteiden aiheuttamia häiriötä ilmavirtoihin.

6.8 Ilman virtauskuviot

6.8.1 Tavoite

Ilman virtauskuvioiden tutkimisen tarkoituksena oli visualisoida ilmavirtoja ja selvittää ilmavirtausten jakautumista leikkaussalissa.

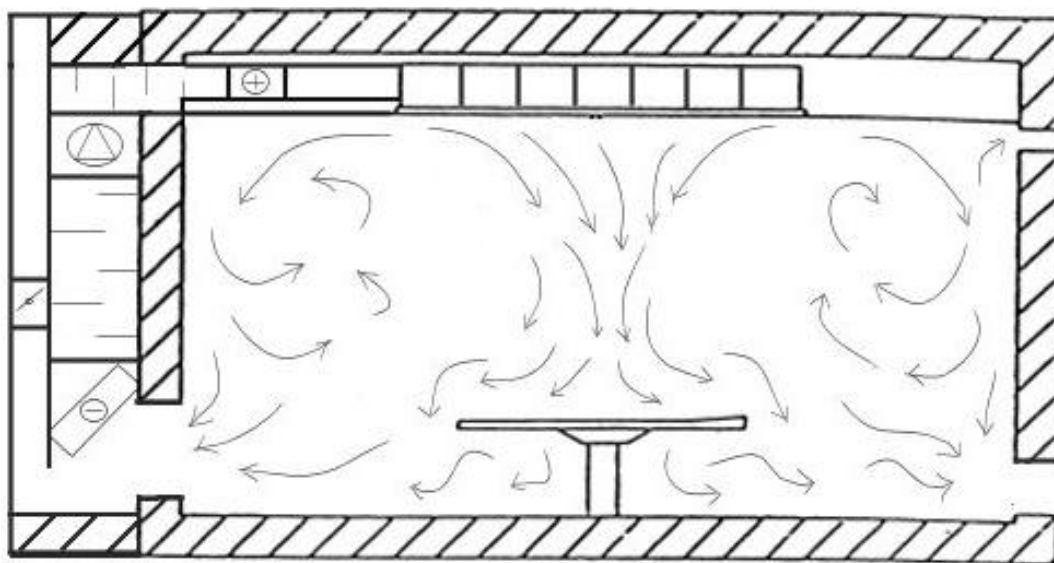
6.8.2 Menetelmät

Valitun ilmanjakotavan tavoitteena oli saavuttaa täydellinen tulo- ja huoneilman sekoittuminen koko leikkaussalissa. Tämän tutkimiseksi ilmavirtaa visualisoitiin savulla. Tuloilmaan syötettävän keinosavun avulla nähtiin ilman liike ja suunta. Savu ei läpäise HEPA-suodattimia, joten savu jouduttiin syöttämään ilmavirtaan suodattimien jälkeen ja tulokset videoitiin. Ilmanopeusmittauksissa saatua tietoa voidaan käyttää myös heittokuvion mallintamiseen, tulokset on nähtävissä liitteessä 8.

Mittausten aikana huone pidettiin vakiolämpötilassa 21 °C, jolloin tuloilma on noin 19,7 °C. Ilmanvaihtokoneelta tuleva ilma pidettiin 17 °C lämpöisenä. Leikkaussali pidettiin n. 24 Pa ylipaineisena käytävään nähden ja etuhuone n. 20 Pa ylipaineisena käytävään nähden. Kierrätysilmakoneen ilmamäärä oli n. 2400 l/s ja 2200 l/s, tulo ja poistoilma pidettiin ennallaan.

6.8.3 Tulokset

Visualisoinnin tuloksena havaittiin, että huoneen keskellä ilmavirta kääntyi leikkauspöydälle tuloilmasuihkujen törmäyksen vaikutuksesta. Salin sivuilla ilma pyörteili seiniä pitkin, sekoittui huoneilmaan ja liikkui hiljalleen kohti kierrätys- ja poistoilmasäleiköitä. Huoneesta ei löydetty alueita, joissa ilma seisoj paikallaan. Selvästi havaittavia eroja ilman käyttäytymisessä ei kahden tutkitun ilmamäärän välillä havaittu. Ilmavirran käyttäytyminen on esitetty piirroksen muodossa kuvassa 24.



KUVA 24. Ilmavirtojen käyttäytyminen savutestin perusteella

6.8.4 Tulosten tarkastelu

Suoritettujen tutkimusten perusteella tuloilma sekoittuu hyvin huoneilmaan ja liikkuu kaikkialla huoneessa. Ilman liike on tärkeää tasaisen ilmanlaadun kannalta.

Huomioitavaa on, että leikkaussalista puuttuivat valaisimet, laitteisto ja henkilökunta, jotka olisivat vaikuttaneet ilman liikkeeseen fyysisellä läsnäolollaan ja konvektiovirtauksilla.

7 YHTEENVETO

Ilmanvaihtoratkaisua tutkittaessa havaittiin, että hajottajat ja suodattimet ovat tiiviitä eivätkä päästä hiukkasia tuloilman mukana tilaan. Mitattujen palautumisaikojen perusteella suodattimet myös suodattavat tehokkaasti tilassa syntyvät epäpuhtaudet. Alakattossa olevat poistoventtiilit parantavat tilan puhtautta poistamalla alakattoon mahdollisesti pääsevät epäpuhtaudet. Mittauksissa havaittiinkin tilan olevan lähes hiukkasvapaa ja yltävän koko salissa lähelle ISO 2 -luokan raja-arvoja.

Tilaajan asettamat tavoitearvot leikkaussalissa toteutuivat huoneilman puhtaudelle ja palautumisajalle, mutta tavoiteltua äänenpainetasoa ei saavutettu suunnitellulla ilmavirralla. Ilmannopeudet leikkausalueella olivat suuria, mutta nopeuksia voidaan pienentää muuttamalla suuttimien jakaumaa. Tilassa oli tasaiset lämpöolosuhteet.

Uutta sairaalaa varten tuloilmasuihkun tasapainotus olisi hyvä tehdä aina salikohtaisesti. Tasapainotus voidaan laskea hajottajien painehäviöistä saatavan ilmamäärän perusteella ja voidaan todeta savulla tarpeen mukaan.

Tässä tutkimuksessa leikkaussalilaitteiden tai henkilöstön vaikutuksia ei tutkittu.

7.1 Työn johdosta tapahtunut kehitys

Ilmannopeuksia tutkittaessa löydettiin suutinhajottajien asetelma, jolla ilmasuihku saatiin suunnattua huoneen keskipisteeseen. Palautumisajan, puhtausluokan ja ilmannopeuksien suhteen ei nähty estettä laskea ilmamääriä ja äänimittausten tulosten perusteella ilmavirtoja päätettiin laskea alkuperäisestä 2400 litrasta sekunnissa 2200 litraan sekunnissa tulevia leikkaussaleja varten.

Testitilan rakennusvaiheessa löydettiin kehitettäviä seikkoja niin laitteista kuin suunnitelmista. Asennuksen yhteydessä hajottajista havaittiin seikkoja, joita kehittämällä hajottajista saatiin tehtyä asennusystävällisempiä. Hajottajien asennus rengaskanavistoon oli haastavaa rajoitetun asennuskorkeuden ja tarkan mitoituksen takia. Hajottajien mitoitusta muutettiin lopulliseen versioon, joka antavat joustavuutta asennukseen. Suodattimen kiinnitystä kehitettiin siten, että suodatin keskittyy automaattisesti kehukseen, helpottaen asennusta ja poistaen asentajan aiheuttaman virheen mahdollisuuden.

Kierrätysilmakone oli prototyyppi, ja sen viimeistelyssä havaittiin joitakin puutteita, joista ilmoitettiin valmistajalle. Puhaltimilta puuttuivat huoltoluukut, eikä kierrätysilmakoneessa ollut valmiita läpivientejä, joten liitännät ja läpiviennit jouduttiin tekemään jälkikäteen koneeseen. Äänitekniisiin ominaisuuksiin olisi syytä myös kiinnittää huomiota.

Ylipaineventtiileiden rakenne oli toiminnan ja esteettisyyden kannalta kyseenalainen, josta ilmoitettiin tilaajalle. Venttiilit eivät ole tiiviitä niiden ollessa suljettuina. Venttiilien olisi hyvä olla tiiviit, jos ylipaine tilassa laskee huomattavasti esimerkiksi huollon aikana tai vikatilanteissa. Venttiilien oli tarkoitus myös estää röntgensäteiden läpäisemistä, mutta käytetyissä pelleissä ei ollut minkäänlaista röntgensuojausta.

Leikkaussalista mitattiin myös valaistustasot, jota käytettiin referenssidatana tuleville leikkaussaleille. Valaisimistakin löytyi kehitettävä. Valaisimet olivat alakattovaloja, joihin tuli lasinen etulevy. Etulevy varmistetaan neljällä turvavaijerilla valaisimen runkoon, jottei etulevy tipahda asennuksessa tai jos etulevyn kiinnitys pettää. Vaijeriden huomattiin irtoavan itsestään ja tämä kumoo niiden merkityksen. Valaisimien kiinnikkeiden havaittiin olevan hieman liian pitkiä, ja tämä aiheutti ongelmia asennuksessa. Kiinnikkeistä puuttui myös ruuveja, jotka usein löytyivät irrallisena valaisimen sisältä. Varjostin oli varustettu suojamaadoituksella, mutta niitä ei ollut tehtaalla kytketty ja piuhat roikkuivat irrallisina. Lasisen etulevyn takia valaisimet painoivat melko paljon, hieman alle 10 kg per valaisin, mikä aiheuttaa kuormaa alakatolle ja kattoon joudutaan kannakoimaan tiheästi.

7.2 Jatkokehitys

Leikkaussalin sekoittavaa ilmanjakoa olisi hyvä tutkia myös laitteiden ja henkilöstön kanssa. Laitteet ja henkilöstö luovat fyysisen esteen ilmavirroille ja aiheuttavat konvektiovirtauksia. Salin hiukkaspitoisuuksia tulisi myös tutkia simuloidussa leikkauksessa, jotta voitaisiin selvittää salin todellinen puhtausluokka leikkauksen aikana.

Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista verrata sekoittavan ja laminaarisen ilmanjaon eroavaisuuksia. Tämä edellyttäisi mittausten suorittamista molemmilla ilmanjaoilla samoilla mittausolosuhteilla simuloituja leikkauspäästöjä käyttäen.

LÄHTEET

1. Sairaalaliitto. Energiansäästö ja sairaalahygienia. Helsinki: Sairaalaliitto. 1990.
2. SIS-TS 39:2012. Vägledning och grundläggande krav för mikrobiologisk renhet i operationsrum. Stockholm: Swedish standards institute SIS.
3. VTT. High-tech sairaala – Korkean hygienian hallinta sairaaloissa. Tampere: VTT 2012.
4. SFS-EN ISO 14644-1:2000. Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 1: Puhtausluokitus. Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu ja julkaistu suomenkielisenä.
5. Sairaalaliitto. Sairaaloiden LVI-laitteiden hygienia. Helsinki: Sairaalaliitto. 1990.
6. Kuntaliitto. Infektioiden torjunta sairaalassa. Helsinki: Kuntaliitto. 2005.
7. Takki, Tarja 1988. Leikkaussalin mikrobi- ja hiukkaspitoisuus eri ilmanjakotavoilla. Helsingin Teknillinen Korkeakoulu. Koneinsinööriosasto. Diplomityö.
8. Rantala, Arto 2009. Onko leikkaussalin ilmastoinnin laminaarivirtaus rahan tuhlausta? Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim 19.
9. Kjell, Rosjo 2013. Laminar air flow (LAF) in operating theatres with individual climatized, ventilated and ultra clean air zones, an international patent system. AET-ARBEIDSMILJO OG ENERGITEKNIKK AS, NO-2011.
10. Lidwell, O. M. 1982. Effect of ultraclean air in operating rooms on deep sepsis in the joint after total hip or knee replacement: a randomized study. British Medical Journal (285) s. 10-14.
11. Lindwell, O. M. 1983. Airborne contamination of wounds in joint replacement operations: the relationship to sepsis rates. Journal of Hospital Infection (4), s. 111-131.
12. Standards for classification of cleanrooms. PDF -dokumentti.
<http://www.icccs.net/news/ClassificationOfCleanrooms2005.pdf>
Luettu 14.09.2013
13. Jantunen, Olli-Pekka 2012. Sairaalailmanvaihdon standardisointi. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
14. Ryynänen, Jouko 2007. Sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeita. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
15. Seppänen, Olli. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo: Kirjapaino kiitorata Oy. 1996.
16. Seppälä, A. Pölynhallinnan käsikirja. PDF -dokumentti.

- http://www.astq.composer.fi/images/esite/Polyhallinnan_kasikirja.pdf. Luet-
tu 12.09.2013.
17. RATU 82-0239:2000. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakenteiden purku. Rakennusteollisuuden Keskusliitto ja Rakennustietosäätiö.
 18. Biobe Oy. Suodattimien tuote-esite.
<http://www.biobe.fi/tuotteet/suodattimet/luokitus.htm>. Päivitetty 31.03.2009.
Luettu 12.7.2013.
 19. Tulokas, Teppo 2009. Sisäilmaolosuhteiden hallinta museokohteessa. Metropolian ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
 20. Kannelsalo, Harri 2012. Puhdastilojen painehallintajärjestelmän suunnittelu korjaushankkeessa. Metropolian ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
 21. Intag, L. E. 1975. An investigation of the importance of air flow in control of postoperative infections. *Ashrae Journal*, helmikuu, s 27-33.
 22. Brandt, Christian ym. 2008. Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect on the surgical site infection rate in orthopedic an abdominal surgery. *Annals of Surgery* 248, 5, s. 695-700
 23. Brandt, Cristian ym. 2011. Laminar airflow ceiling size: no impact on infection rates following hip and knee prosthesis. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 32, 11, s. 1097-1102.
 24. Gastmeier, P ym. 2012. Influence of laminar airflow on prosthetic joint infections: a systematic review. *Journal of Hospital Infections* 81, s. 73-78.
 25. SFS-EN ISO 14644-3:2006. Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 3: Metrologia ja testimenetelmät. Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

LIITE 1.**Sairaalan ilmanvaihdon ohjeellisia suunnitteluarvoja [14]**

Tila	Ulkoilmavirta (l/s)/m²	IV-kerroin 1/h	Tuloilman suodatus	Ilman nopeus m/s	Suhteellinen kosteus %	Lämpötila °C	Äänenpaine dB(A)	Painesuhde	ISO- luokka
Leikkaussalit (korkea hygienia)	14 - 22	> 17	F5 + F8 +H12	> 0,2	45 - 55	22 +/- 3	28	ylip. 15 Pa	5
Yleisleikkaussali	14 - 22	> 17	F5 + F8 +H10	> 0,2	45 - 55	22 +/- 3	28	ylip. 10 - 15 Pa	7
Infektioleikkaus	14 - 22	> 17	F5 + F8 +H10	> 0,2	45 - 55	22 +/- 3	28	alip. 0 - 10 Pa	7
Välinehuolto, pesu	3 - 8	10 - 15	F5 + F8	0,2 - 0,3	-	20 - 23	40 - 45	ylip.	-
sterilointi ja steriili varasto	8	10 - 15	F5 + F8 +H10	-	-	22 +/- 2	40	ylip.	-

Leikkausalin rengaskanavan mallinnus

Tuloilma leikkaussaliin

24 x DHN

qv 2500 L / s

A_{inlet} 0.77 m²v_{inlet} 3.246753 m / s

DHN-NKS 400

qv 104 L / s

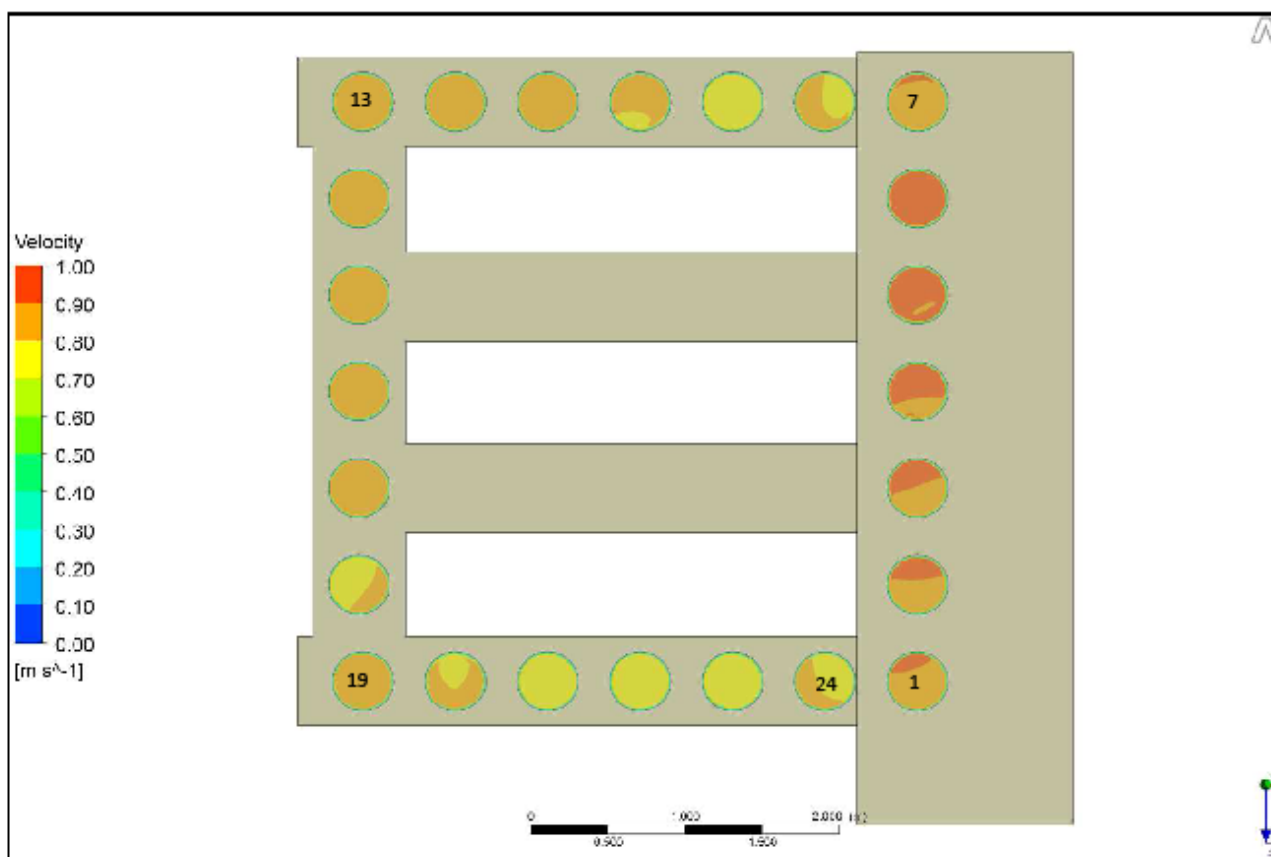
A 0.1257 m²v_{free} 0.829 m / s

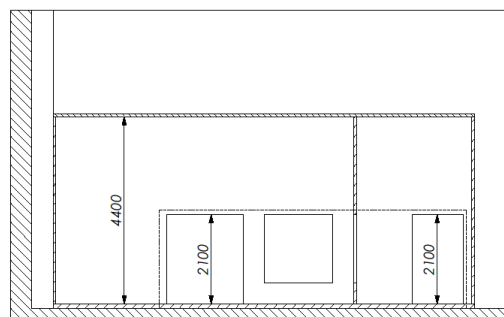
dp 70 Pa

Results

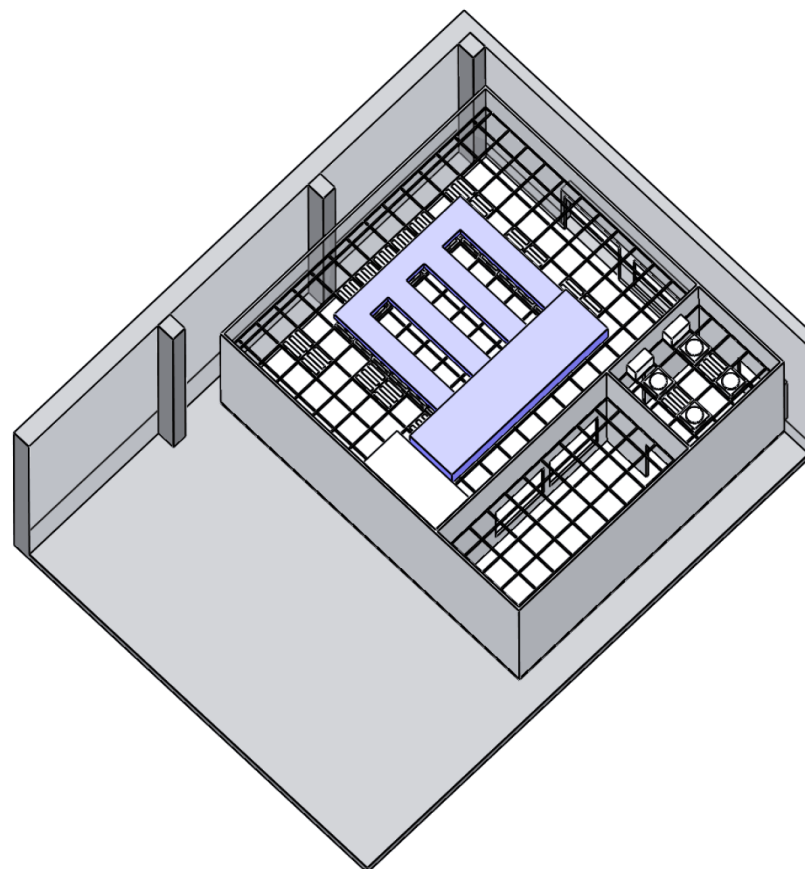
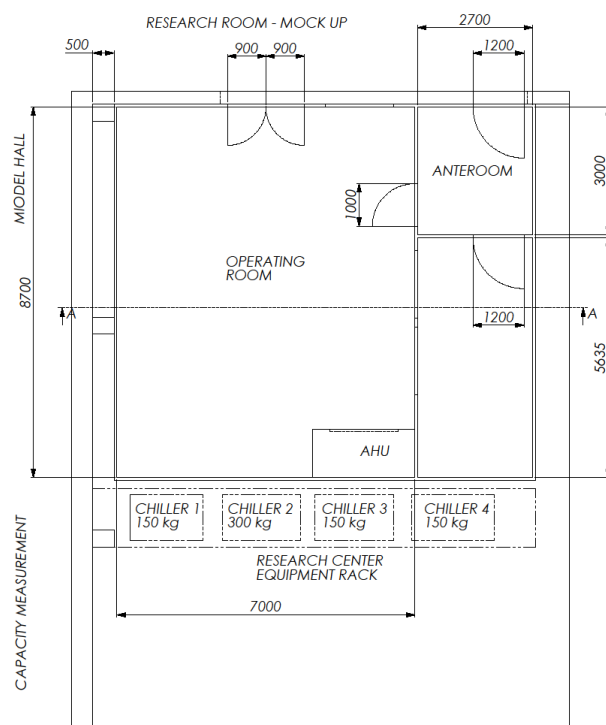
	kg / s	QRC	m / s	L / s	ero	ero %
Opening 01	-0.1321	943	0.94	111	7	7 %
Opening 02	-0.1335	947	0.93	113	9	8 %
Opening 03	-0.134	942	0.94	113	9	9 %
Opening 04	-0.1347	948	0.93	114	10	9 %
Opening 05	-0.1349	948	0.93	114	10	9 %
Opening 06	-0.1351	951	0.93	114	10	9 %
Opening 07	-0.1328	973	0.91	112	8	8 %
Opening 08	-0.1198	985	0.89	101	-3	-3 %
Opening 09	-0.1119	1111	0.76	94	-10	-9 %
Opening 10	-0.1191	1062	0.81	101	-4	-4 %
Opening 11	-0.1256	1020	0.86	106	2	2 %
Opening 12	-0.1285	1006	0.87	108	4	4 %
Opening 13	-0.1224	1041	0.83	103	-1	-1 %
Opening 14	-0.1232	1046	0.83	104	0	0 %
Opening 15	-0.126	1025	0.85	106	2	2 %
Opening 16	-0.1234	1038	0.84	104	0	0 %
Opening 17	-0.1234	1035	0.84	104	0	0 %
Opening 18	-0.1182	1056	0.82	100	-4	-4 %
Opening 19	-0.1224	1042	0.83	103	-1	-1 %
Opening 20	-0.1189	1066	0.81	100	-4	-4 %
Opening 21	-0.1083	1095	0.78	91	-13	-12 %
Opening 22	-0.1086	1129	0.75	92	-13	-12 %
Opening 23	-0.1069	1143	0.73	90	-14	-13 %
Opening 24	-0.1189	1001	0.88	100	-4	-4 %

kg / s m³ / s L / s
-2.963 -2.502 -2502





SECTION A-A



NKS OPERATING ROOM TEST

NKS 4B

20.11.2013
paavri

rev 3

150



LIITE 4.

Puhdastilan ilmatiiveystesti

Mittapäivä 22.10.2013

Mittaaja Veli Koskinen

Pelkkä syöttökanava ja painepelti 0 Pa => ~ 0 l/s

Huomioitavaa:

- Sulkupellit kiinni
- poistoelimet teipattu
- oven lukkopesät teipattu
- IV-kone seis
- Etuhuoneen hajottajat tulpattuna

Ilmaa syötetään etuhuoneeseen niin paljon, että tilassa vallitsee 50 Pa koepaine.

Koepaine pidetään 5min ajan, jonka jälkeen tulokset kirjataan

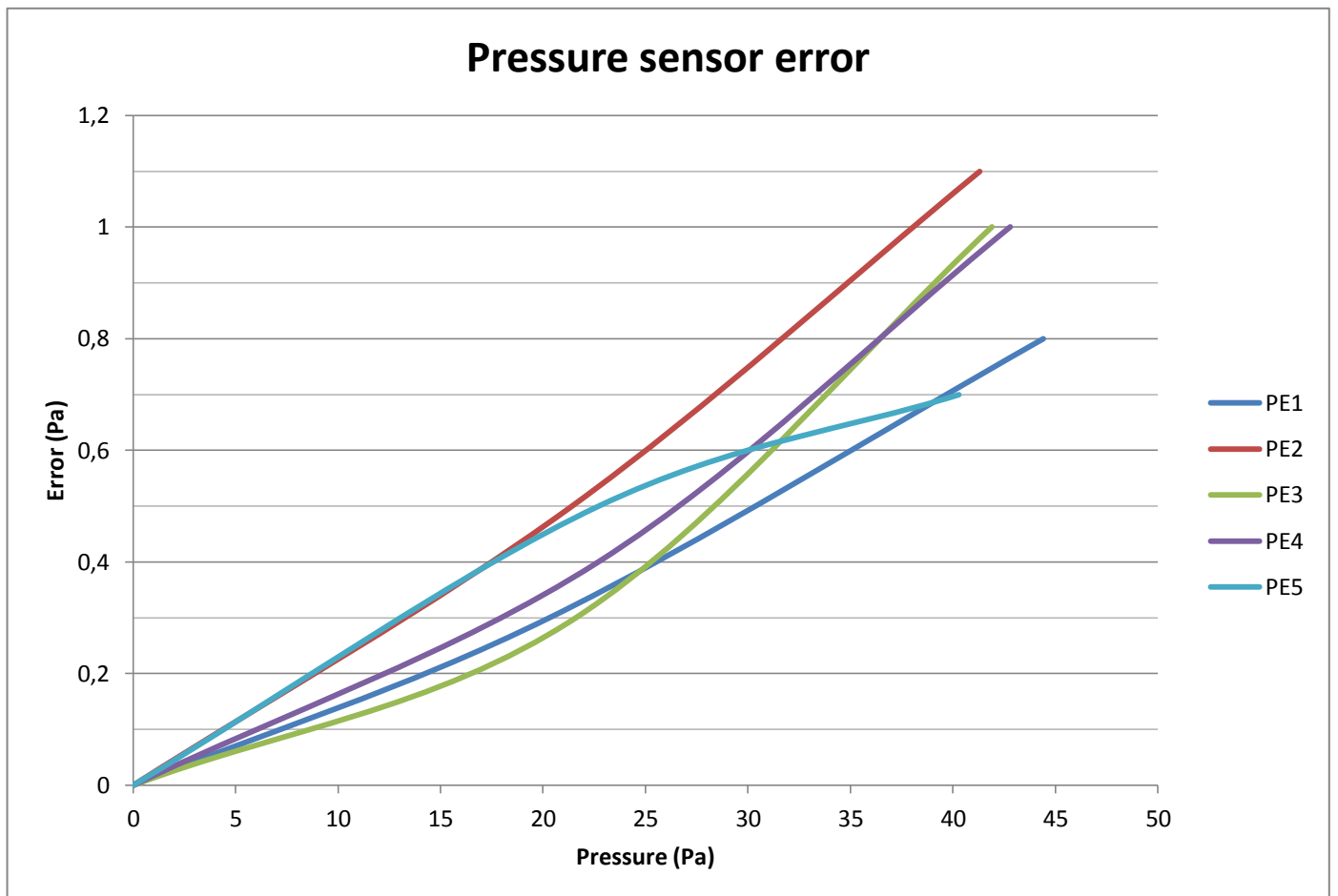
Kaikki väliovet auki				
Vaipan pinta-ala		A =	330,7	m ²
		V =	371,3	m ³
Mittalaippa		D =	104,76	mm
Lämpötila			24,6	°C
Virtaama laipan läpi:				
Δp	l/s	m ³ /h		
50	56,2	202,32		
	Tavoite	Mitattu		
Mittapaine	50	49,9	Pa	
Vuoto	< 0,4	0,17	l/s,m ²	
	132,3	56,2	l/s	
q ₅₀	1,28	0,54	1/h	
n ₅₀	1,44	0,61	m ³ /m ² ,h	
Leikkaussali - käytävä		50	Pa	

Etutilan ja leikkaussalin väliovi kiinni				
Vaipan pinta-ala	A =	147,3	m ²	
	V =	103,4	m ³	
Mittalaippa	D =	104,76	mm	
Lämpötila		22,4	°C	
Virtaama laipan läpi:				
Δp	l/s	m ³ /h		
45	52,9	190,44		
	Tavoite	Mitattu		
Mittapaine	50	50,1	Pa	
Vuoto	< 0,4	0,36	l/s,m ²	
	58,9	52,9	l/s	
q ₅₀	2,05	1,84	1/h	
n ₅₀	1,44	1,29	m ³ /m ² ,h	
Leikkaussali - käytävä	33	Pa		

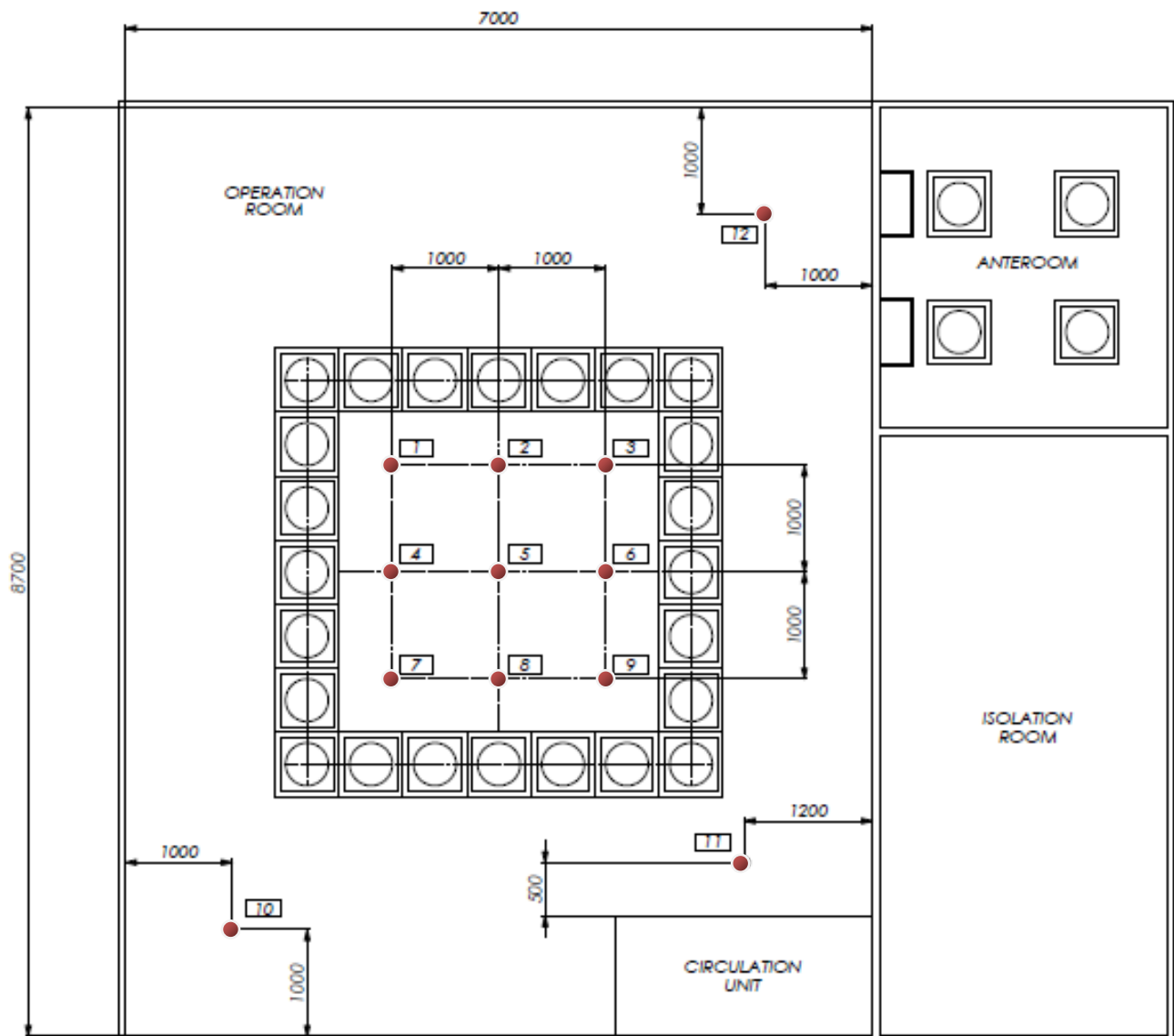
Kaikki väliovet kiinni				
Vaipan pinta-ala		A =	66,36	m ²
		V =	35,6	m ³
Mittalaippa		D =	104,76	mm
Lämpötila			24,6	°C
Virtaama laipan läpi:				
Δp	l/s	m ³ /h		
37,5	48,4	174,24		
		Tavoite	Mitattu	
Mittapaine	50	50,0	Pa	
Vuoto	< 0,4	0,73	l/s,m ²	
	26,5	48,4	l/s	
q ₅₀	2,68	4,89	1/h	
n ₅₀	1,44	2,63	m ³ /m ² ,h	
Leikkaussali - käytävä		20	Pa	

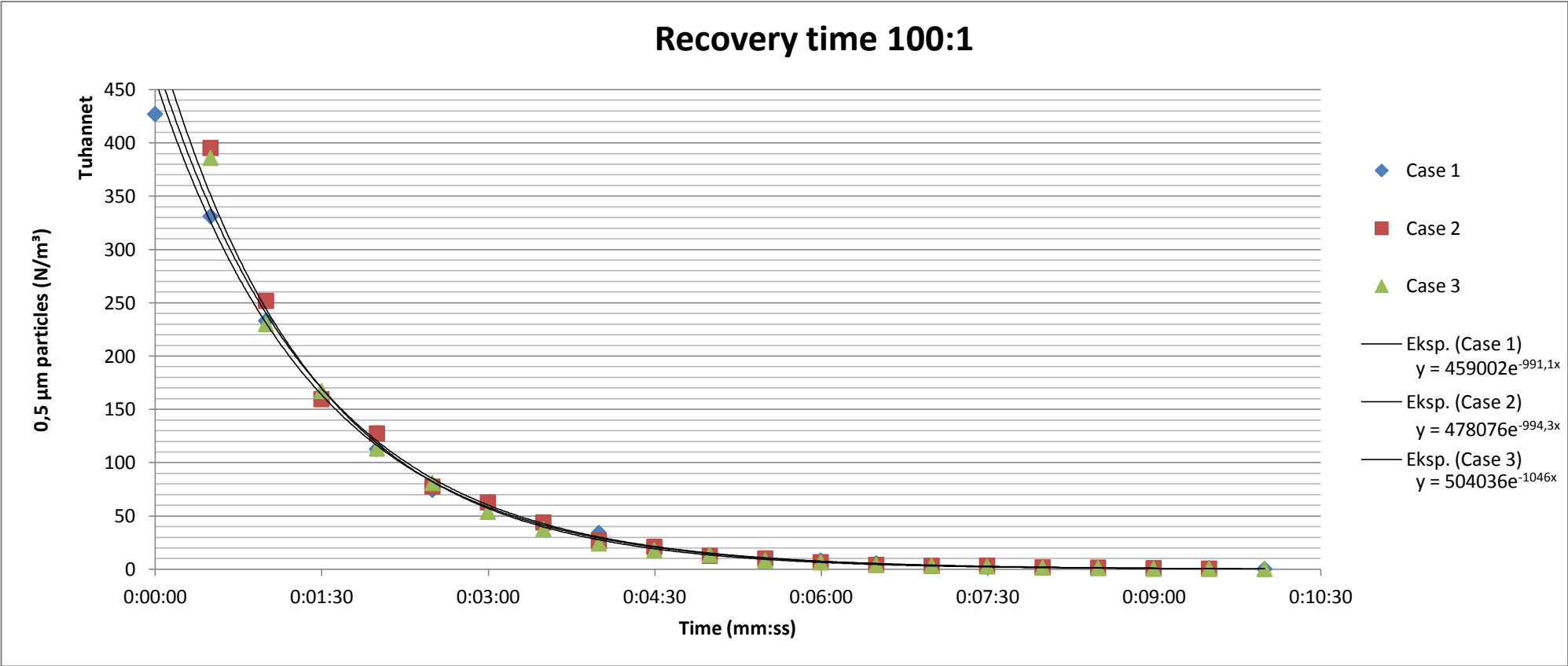
Paineantureiden kalibrointi

	Target 0 Pa			Target ~20 Pa			Target ~40 Pa		
	Sensor	FCO510	difference	Sensor	FCO510	difference	Sensor	FCO510	difference
PE1	0	0	0	20,3	20	0,3	44,4	43,6	0,8
PE2	0	0	0	21,4	20,9	0,5	41,3	40,2	1,1
PE3	0	0	0	21,6	21,3	0,3	41,9	40,9	1
PE4	0	0	0	22,7	22,3	0,4	42,8	41,8	1
PE5	0	0	0	22,7	22,2	0,5	40,3	39,6	0,7
average			0			0,4			0,92



LIITE 6.
Mittapisteet





$$C(t) = C_0 e^{-nt}$$

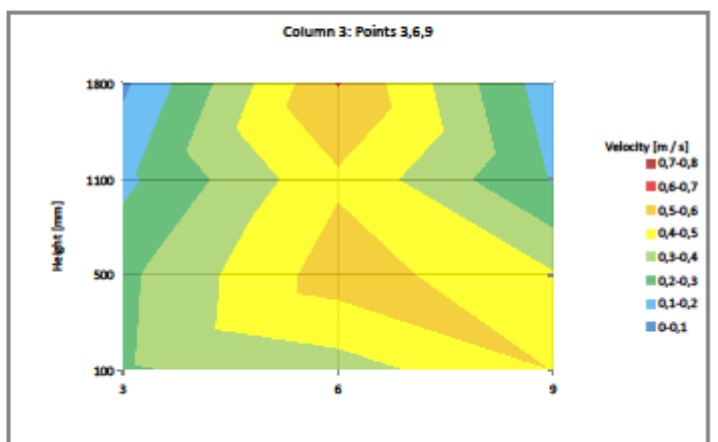
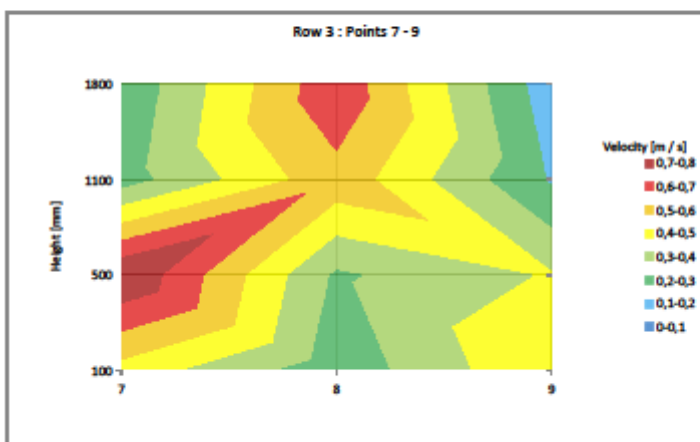
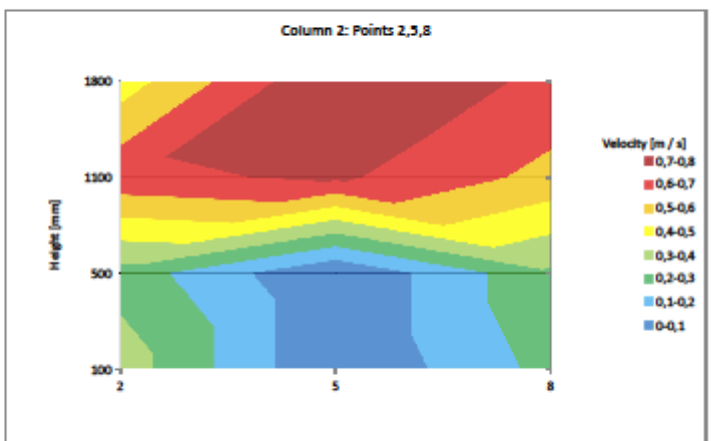
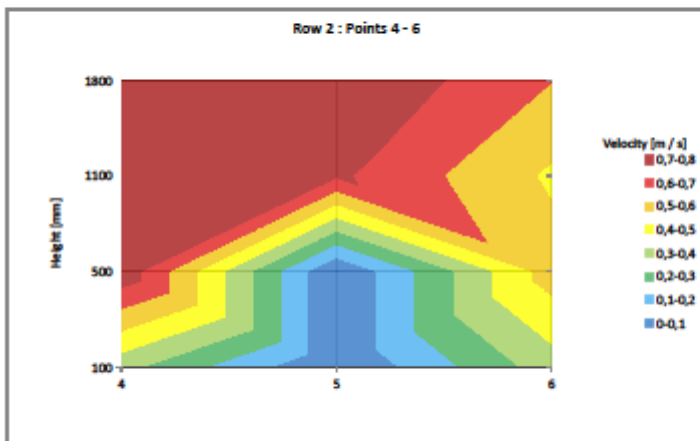
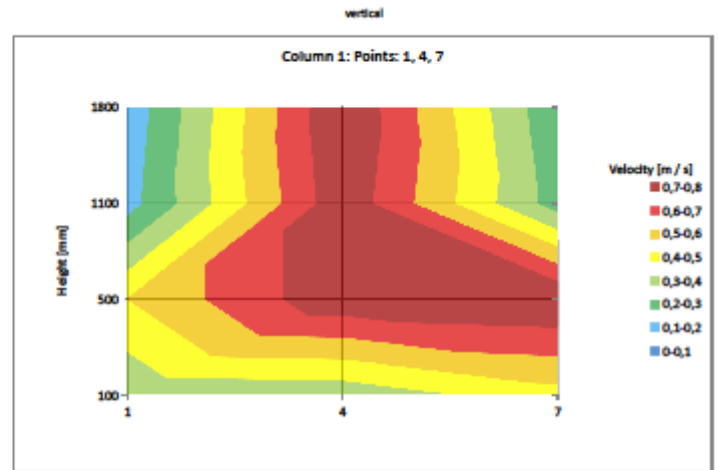
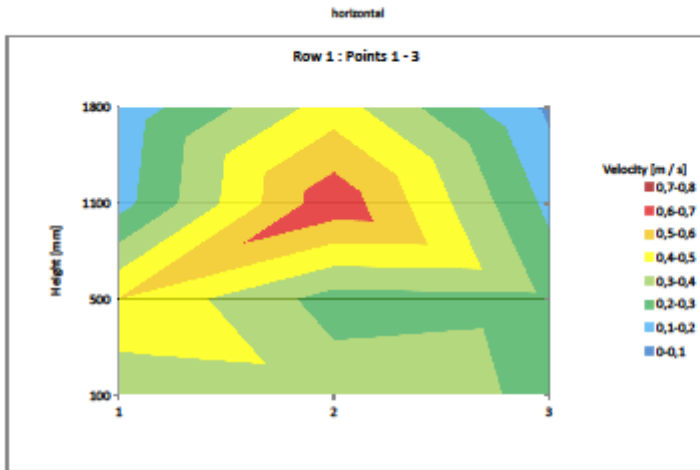
<i>particles</i>	<i>case 1 (mm:ss)</i>	<i>case 2 (mm:ss)</i>	<i>case 3 (mm:ss)</i>	
352000	00:23	00:27	00:30	
3520	07:05	07:07	06:50	average
recovery time	06:41	06:40	06:20	06:34

Ilmannopeudet, 2400 l/s, alkuperäinen asetus

Vaakaleikkaukset

Pystyleikkaukset

Air velocities, airflow 2400 l/s, initial set-up

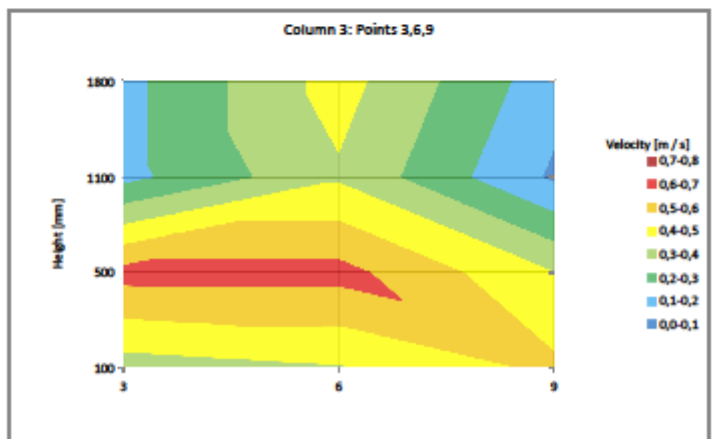
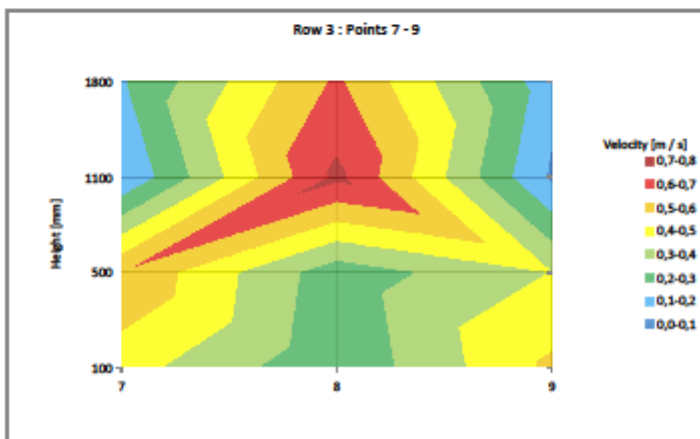
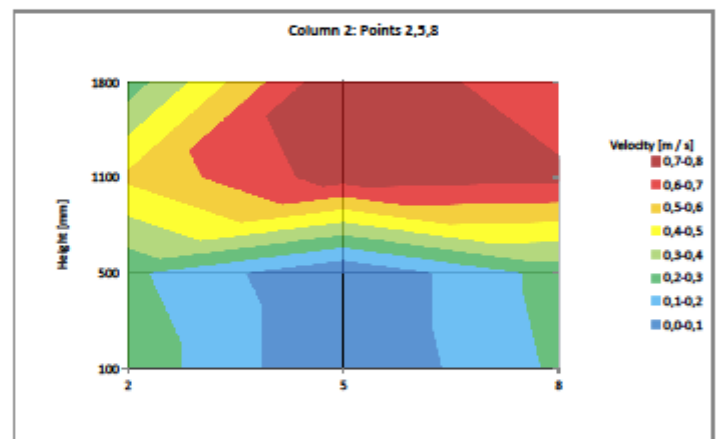
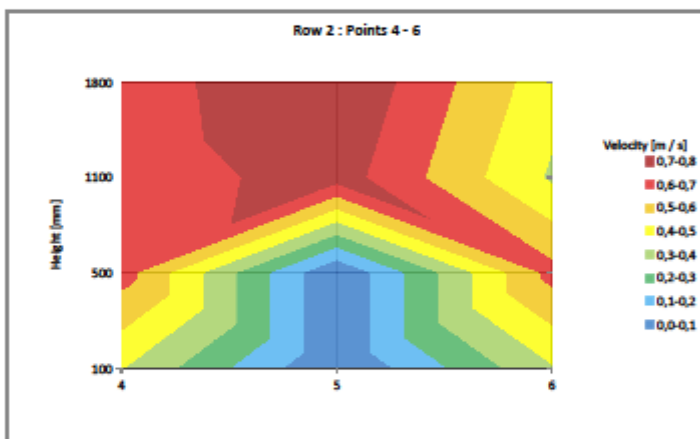
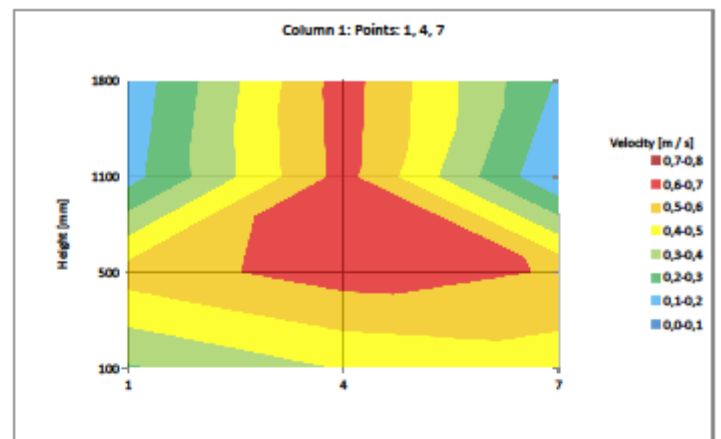
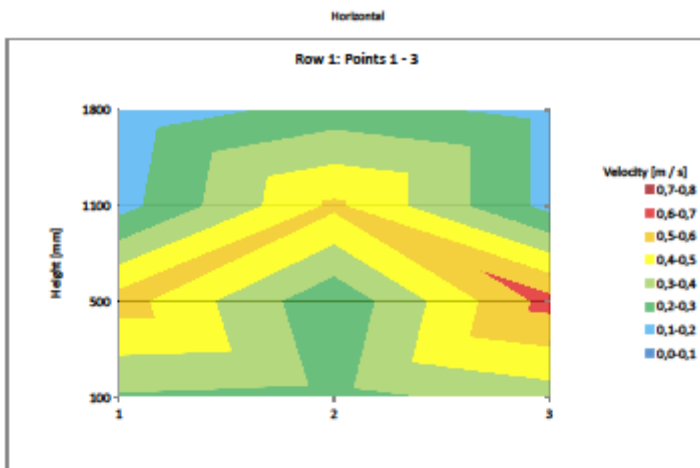


Ilmanopeudet, 2400 l/s, suuttimet hienosäädettynä

Vaakaleikkaukset

Pystyleikkaukset

Air velocities, airflow 2400 l/s, nozzles adjusted



Ilmannopeuksien kuvaajat

Ilmannopeudet, 2200 l/s, suuttimet hienosäädettynä

Vaakaleikkaukset

Pystyleikkaukset

